

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita  
Ostrava**

**Fakulta materiálově – technologická**

*Katedra materiálového inženýrství*



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**MASTER'S THESIS**

### **POSOUZENÍ VLIVU OBVODOVÉHO SVAROVÉHO SPOJE NA INTEGRITU OCELOVÉHO PLYNOVODNÍHO POTRUBÍ**

**INFLUENCE OF CIRCUMFERENTIAL WELD JOINT ON INTEGRITY  
OF STEEL GAS PIPELINE**

**Vypracoval:**

Bc. Pavel Peňáz

Author:

**Vedoucí práce:**

doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.

Supervisor:

**Ostrava**

**2019**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Peňáz**

Studijní program: N3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor: 3911T036 Progresivní technické materiály

Téma: Posouzení vlivu obvodového svarového spoje na integritu ocelového  
plynovodního potrubí  
Influence of circumferential weld joint on integrity of steel gas pipeline

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Technický popis a funkce zařízení.
2. Požadavky na materiálové vlastnosti ocelových trubních materiálů.
3. Technologie svařování.
4. Metalurgický proces svařování.
5. Experimentální část - výroba svarového spoje, odběr vzorků, hodnocení struktury a vlastností svarového spoje.
6. Vyhodnocení výsledků a závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] GAJDOŠ, L. a kol. Bezpečnost a integrita vysokotlakých plynovodů. Praha : Český plynárenský svaz, 2011. ISBN 978-80-904619-2-5.
- [2] Kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava : Český svářečský ústav s.r.o., 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [3] JEFFUS, L., F. Welding: Principles and Applications. 8th edition. Boston: Cengage Learning, 2016. ISBN 978-1-305-49469-5.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Jonáš, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2018

Datum odevzdání: 23.04.2019

prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# **Zásady pro vypracování diplomové práce**

## **I.**

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## **II.**

### Uspořádání diplomové práce:

- |  |  |
|--|--|
| 1. Titulní list  | 6. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |
| 2. Originál zadání DP  | 7. Obsah DP                                  |
| 3. Zásady pro vypracování DP   | 8. Textová část DP                           |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení   | 9. Seznam použité literatury                 |
| 5. Prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP | 10. Přílohy                                  |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP.

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP.

ad 5) V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 6) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 7) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 8) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 10).



Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 9) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 10) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta materiálově - technologická*  
*Katedra . . . . .*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia Fakulty materiálově – technologické, Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2018/2019.

Ostrava 12. 11. 2018

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka Fakulty materiálově- technologické  
VŠB-TU Ostrava



# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.**

V Ostravě ..... 30.4.2019

.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá posouzením vlivu obvodových svarových spojů na integritu ocelových potrubí, které jsou určeny pro rozvod topných plynů v plynárenství.

Součástí teoretické práce je analýza požadavků na materiálové vlastnosti ocelových trubních materiálů v plynárenství, které jsou určeny pro veřejné zásobování. V plynárenství se pro potrubní aplikace používají ocelové materiály, které byly zpracovány do stavu normalizačně žíhaného nebo do stavu termomechanicky zpracovaného.

Cílem experimentální části je prověřit jednotlivé trubní materiály a jejich vhodnost ke zhotovení kvalitního svarového spoje vzhledem k použité metodě tavného svařování a to vyhodnocením provedených nedestruktivních a destruktivních mechanických a metalografických zkoušek svarových spojů jednotlivých materiálů.

Zhotovení svarových spojů bylo provedeno metodou tavného svařování, která se běžně používá v montážní praxi při výstavbě plynárenských rozvodných zařízení.

## **Klíčová slova**

rozvod plynu, ocelové materiály, svarový spoj, zkoušky materiálů a svarů

## **Abstrakt**

This diploma thesis deals with the assessment of the influence of circumferential weld joints on the integrity of steel pipelines which are intended for the distribution of heating gases in the gas industry.

Part of the theoretical work is the analysis of the requirements for material properties of steel pipe materials in the gas industry which are intended for public supply. In the gas industry steel materials are used for pipeline applications that have been processed into normalized annealed or thermomechanically processed state.

The aim of the experimental part is to verify the individual pipe materials and their suitability for the production of a quality weld joint with respect to the fusion welding method used, by evaluating the non-destructive and destructive mechanical and metallographic tests of the weld joints of the individual materials.

The production of welded joints was carried out by the method of fusion welding which is commonly used in assembly practice in the construction of gas distribution installations.

## **Key words**

gas distribution, steel materials, weld joint, materials and weld tests

### **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval všem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě této diplomové práce. Poděkování patří především mému vedoucímu, doc. Ing. Petru Jonštovi, Ph.D. za podnětné rady a připomínky.

Tato diplomová práce vznikla za přispění projektů Studentské grantové soutěže „SP2019/27 „Využití metod strukturní analýzy, zkoušení mechanických vlastností a nedestruktivní defektoskopie při komplexní charakterizaci pokročilých materiálů“ a „SP2019/43 Specifický výzkum v metalurgickém, materiálovém a procesním inženýrství“.

This diploma thesis created with the contribution of the projects Student Grant Competition “SP2019/27 Application of structural analysis, mechanical property testing and non-destructive defectoscopy methods at complex characterization of advanced materials” and “SP2019/43 Specific research in the metallurgical, materials and process engineering”.



# OBSAH

<b>Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Technický popis a funkce zařízení.....</b>	<b>1</b>
1.1 Rozdělení plynovodů dle provozního tlaku a účelu pro plynárenská zařízení.....	2
1.2 Provozní zatížení plynovodů .....	4
<b>2 Požadavky na materiálové vlastnosti ocelových trubních materiálů.....</b>	<b>4</b>
2.1 Základní požadavky na ocelové trubní materiály a spolehlivost plynovodů .....	4
2.2 Chemické složení a vliv na svařitelnost ocelí .....	6
2.3 Struktura a vlastnosti používaných ocelí .....	6
2.4 Tepelné a tepelně deformační zpracování a vliv na vlastnosti ocelí .....	7
2.4.1 Normalizačně žíhané jemnozrnné oceli.....	7
2.4.2 Termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli .....	8
2.5 Výrobně technologické vlivy.....	10
2.5.1 Bezešvé trubky .....	10
2.5.2 Podélně a spirálovitě svařované trubky.....	11
2.6 Mechanické vlastnosti .....	12
2.6.1 Pevnostní a plastické vlastnosti .....	12
2.6.2 Lomově mechanické vlastnosti.....	13
2.7 Požadavky provozovatele distribuční a přepravní soustavy pro ocelové plynovody .....	15
2.7.1 Požadavky pro výstavbu a rekonstrukce NTL a STL plynovodů .....	15
2.7.2 Požadavky pro výstavbu a rekonstrukce VTL plynovodů.....	16
2.8 Požadavky na svařitelnost ocelových a trubních materiálů .....	18
<b>3 Technologie a metalurgický proces svařování.....</b>	<b>19</b>
3.1 Volba a popis metody tavného svařování .....	19
3.1.1 Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (metoda 111) .....	21
3.2 Volba základních materiálů .....	22
3.3 Volba přídavných materiálů.....	23
3.4 Popis vzniku svarového spoje při tavném svařování .....	24
3.4.1 Tepelně ovlivněná zóna .....	25
3.4.2 Napětí a deformace při svařování.....	27
3.4.3 Druhy napětí při svařování.....	28
3.5 Vady svarových spojů při tavném svařování .....	28
3.5.1 Výskyt vad u obloukového svařování.....	30
3.5.2 Výskyt vad u obvodových montážních svarů .....	31

3.6 Svařitelnost uhlíkových ocelí .....	32
3.6.1 Svařitelnost jemnozrnných ocelí.....	32
3.6.2 Svařitelnost termomechanicky zpracovaných ocelí.....	33
3.7 Požadavky provozovatele na proces svařování ocelových plynovodů .....	34
3.8 Požadavky provozovatele na rozsah zkoušek a jakost svarových spojů.....	35
3.8.1 Nedestruktivní zkoušení svarů .....	36
3.8.2 Destruktivní zkoušení svarů u VTL plynovodů .....	37
3.8.3 Požadavky na jakost provedených svarů .....	38
<b>4 Experimentální část.....</b>	<b>41</b>
4.1 Volba základních trubních a přídatných materiálů .....	41
4.2 Příprava zkušebních kusů a provedení svarových spojů .....	42
4.3 Nedestruktivní zkoušení svarových spojů.....	44
4.3.1 Vizuální kontrola (VT).....	44
4.3.2 Kapilární zkouška (PT) .....	46
4.3.3 Radiografická zkouška (RT) .....	47
4.4 Destruktivní mechanické zkoušky svarových spojů .....	49
4.4.1 Příčná zkouška tahem .....	50
4.4.2 Příčná zkouška lámavosti .....	53
4.4.3 Zkouška tvrdosti.....	55
4.5 Destruktivní metalografické zkoušky svarových spojů .....	58
4.5.1 Makrostrukturní rozbor .....	58
4.5.2 Mikrostrukturní rozbor .....	61
4.6 Chemická analýza základních trubních materiálů .....	70
<b>5 Vyhodnocení výsledků a závěr .....</b>	<b>71</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>75</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>78</b>

## Úvod

Technické materiály, určené pro rozvody plynu v plynárenství a samozřejmě i jejich svarové spoje představují zásadní důležitost pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu plynárenských rozvodných zařízení. Obecně rozvody plynů z charakteru jejich použití a významu pro společnost představují vyšší míru rizika a ohrožení okolí při jejich provozu, proto jsou legislativně zařazeny mezi tzv. vyhrazená technická zařízení, respektive vyhrazená plynová zařízení a podléhají dohledu Státního odborného dozoru ČR.

Předmětem a cílem této práce je posouzení vlivu obvodových svarových spojů na integritu plynovodních potrubí, vyrobených z ocelových materiálů, které jsou určeny pro potrubní aplikace a rozvod topných plynů v plynárenství.

Pro plynárenská zařízení v oblasti rozvodu plynů, určených pro veřejné zásobování, se používají trubní ocelové materiály, které byly zpracovány do stavu normalizačně žíhaného nebo do stavu termomechanicky zpracovaného.

Ke zhotovení svarových spojů bylo použito metody tavného svařování (ruční obloukové svařování obalenou elektrodou), běžně používané v montážní praxi při výstavbě plynárenských rozvodných zařízení.

Součástí teoretické práce je analýza požadavků na materiálové vlastnosti ocelových trubních materiálů a jejich svařitelnost v plynárenství.

Cílem experimentální části je prověřit jednotlivé trubní materiály a jejich vhodnost ke zhotovení jakostního svarového spoje vzhledem k použité metodě tavného svařování a to vyhodnocením provedených nedestruktivních a destruktivních mechanických a metalografických zkoušek svarových spojů jednotlivých materiálů. Součástí vyhodnocení je přiřazení svarových spojů s definovanými vnějšími a vnitřními vadami do příslušné kategorie kvality plynovodů dle ČSN EN 12732 a to na základě komplexního vyhodnocení všech provedených zkoušek.

## 1 Technický popis a funkce zařízení

Plynová zařízení v oblasti rozvodu plynů zahrnují jak plynárenská zařízení, tak i rozvody plynu, které nejsou v majetku, tudíž ani provozovány plynárenskými společnostmi a které se nazývají odběrná plynová zařízení (OPZ).

Plynárenská zařízení v oblasti rozvodu plynů zahrnují sektor tzv. veřejných plynovodů, provozovaných v tlakové hladině nízkotlakých (NTL), středotlakých (STL) a vysokotlakých (VTL) plynovodů, určených pro veřejné zásobování.



„Neplynárenská“ zařízení tzv. odběrná plynová zařízení (OPZ) zahrnují v oblasti rozvodu plynů tzv. průmyslové a domovní plynovody jak v průmyslové a výrobní sféře, tak i ostatní sféře použití, kde má použití zemního, případně jiného topného plynu své opodstatnění. Nicméně z hlediska používaných ocelových trubních materiálů nejsou kladeny na OPZ tak vysoké materiálové nároky s ohledem na provozní tlak jako pro plynárenská zařízení, ale lze samozřejmě použít stejné ocelové materiály o vyšší úrovni i pro OPZ, tudíž předmětem v dalším textu práce budou jen plynárenská zařízení. Dělicím místem mezi plynárenským zařízením a odběrným plynovým zařízením (OPZ) je hlavní uzávěr plynu (HUP), který ale je legislativně již součástí OPZ.

Přesněji řečeno, plynárenským zařízením se rozumí veškerá plynová zařízení s výjimkou odběrných plynových zařízení.

### **1.1 Rozdělení plynovodů dle provozního tlaku a účelu pro plynárenská zařízení**

Potrubní transport plynu u rozvodu plynů se uskutečňuje pomocí přetlaku. Podle výše hodnoty přetlaku (provozního tlaku), kterým se plyn přepravuje, se plynovody dělí na:

- Nízkotlaké (NTL), s provozním tlakem do 0,005 MPa (5 kPa)
- Středotlaké (STL), s provozním tlakem nad 0,005 až do 0,4 MPa (nad 5 až do 400 kPa)
- Vysokotlaké (VTL), s provozním tlakem nad 0,4 až do 4 MPa
- Velmi vysokotlaké (VVTL), s provozním tlakem nad 4 až do 10 MPa

Nízkotlaké rozvody plynu jsou určeny k lokální dopravě plynu v obcích a městech, kde slouží k zásobování maloodběratelů zejména domácností i velkoodběratelů zejména v oblasti průmyslu, obě kategorie se uplatňují i v komerční sféře.

Středotlaké rozvody plynu jsou určeny k lokální dopravě plynu v obcích a městech, kde slouží k zásobování maloodběratelů zejména domácností a velkoodběratelů zejména v oblasti průmyslu, obě kategorie se uplatňují i v komerční sféře.

Vysokotlaké plynovody, označované také jako dálkové, jsou určeny k vnitrostátní dálkové dopravě plynu do plynofikovaných měst a obcí u nás a k přímým průmyslovým velkoodběratelům.

Velmi vysokotlaké plynovody, označované také jako tranzitní, jsou určeny k dálkové dopravě zemního plynu již na mnohem větší vzdálenosti, většinou mezi jednotlivými zeměmi. Českou republikou prochází například tranzitní plynovod, který dopravuje zemní plyn z Ruska z oblasti těžby zemního plynu do zemí západní Evropy. Z tohoto plynovodu je Českou republikou odebírána značná část plynu pro potřeby ČR [1].

### ***Rozdělení plynovodů do skupin a podskupin dle technických předpisů***

Pro splnění konkrétních technických požadavků při projektování a výstavbě plynovodů v České republice jsou již dnes používány převážně převzaté technické normy ČSN (EN, ISO). Současně tyto implementované normy doplňují v ČR profesní technické předpisy, které zajišťují bližší národní požadavky v plynárenství. Jako profesní technické předpisy v oboru plynových zařízení se označují Technická pravidla G (TPG), Technická doporučení G (TDG) a Technické instrukce (TIN), které jsou vydávány Českým plynárenským svazem. Kromě výše uvedeného je nutné pro projektování a výstavbu plynovodů brát na zřetel i tzv. Technické požadavky, respektive Metodické pokyny majoritního majitele a provozovatele veřejných plynovodů v ČR a to společnosti GasNet, která je členem skupiny Innogy. Metodické pokyny v podstatě vycházejí z požadavků příslušných českých technických norem a profesních technických předpisů, ale jsou doplněny o specifické požadavky majitele a provozovatele veřejných plynovodů v ČR.

Zařazení plynovodů je provedeno dle technického předpisu TPG 702 04 do základních skupin A a B a jejich podskupin s přímou vazbou na evropské normy ČSN EN 12007-1,3,4 a ČSN EN 1594. Současně podskupiny zohledňují tlakové hladiny rozvodů plynu, které se historicky používají v České republice.

#### **Skupina plynovodů A – plynovody s tlakem do 16 barů včetně:**

Podskupina plynovodů A1 - nízkotlaké plynovody do 0,05 barů včetně (NTL)

Podskupina plynovodů A2 - středotlaké plynovody nad 0,05 baru do 4 barů včetně (STL)

Podskupina plynovodů A3 - vysokotlaké plynovody nad 4 bary do 16 barů včetně (VTL)

#### **Skupina plynovodů B – plynovody s tlakem nad 16 barů:**

Podskupina plynovodů B1 - vysokotlaké plynovody nad 16 barů do 40 barů včetně (VTL)

Podskupina plynovodů B2 - vysokotlaké plynovody nad 40 barů do 100 barů včetně (VTL)

Přeprava a distribuce zemního plynu se v ČR ale uskutečňuje a provozuje jen ve čtyřech tlakových hladinách, jelikož tlaková hladina uvedená v podskupině A3 se v České republice nepoužívá. Tato odlišnost vyplývá z historického nesouladu při rozdělení plynovodů podle jednotlivých provozních tlaků v době zavádění evropských norem (EN) do systému české technické normalizace (ČSN) a technických pravidel (TPG).

Nicméně se v plynárenské praxi stále používá historicky zažitá základní rozdělení:

Místní sítě – provozují nízkotlaké a středotlaké plynovody, které jsou zahrnuty v podskupinách A1, A2.

Dálkové plynovody – označují vysokotlaké plynovody, které jsou zahrnuty v podskupinách A3+B1.

Tranzitní plynovody – označují velmi vysokotlaké plynovody, které jsou zahrnuty v podskupině B2 [1, 2].

## **1.2 Provozní zatížení plynovodů**

Při provozu plynovodů se za nejdůležitější zatížení plynovodu považuje namáhání vnitřním přetlakem. Zatížení vnitřním přetlakem u plynovodů nízkotlakých (NTL) není rozhodující, ale vlastní integrita a mechanická pevnost potrubí s nutnou odolností proti vnějším vlivům a zatížení. Plynovodní potrubí kromě vnitřního přetlaku plynu je vystaveno účinkům zatížení hmotností zeminy nad plynovodem, zatížením z nespojitého uložení na dně výkopu, nahodilým zatížením na povrchu terénu, případně pohybem zemin nebo působení korozního prostředí.

Plynovod lze definovat jako válcové tenkostěnné potrubí, které je namáhané vnitřním přetlakem, který ve stěně potrubí vyvozuje obvodové a podélné napětí. Tato napětí se označují jako membránová a vlivem tenkostěnnosti rotačního geometrického tělesa přenášejí pouze napětí tahová. Vzhledem ke své tloušťce je ocelové potrubí schopno přenášet i ohybová napětí, proto se označuje za skořepinu kruhového průřezu. Vzhledem k možnému působení přídatného vnějšího zatížení, které vzniká např. při pohybu zemin nebo deformaci terénu, případně nežádoucím bodovém podpírání potrubí vlivem nedostatečně vyrovnaného dna výkopu, musí být potrubí schopno přenášet i napětí ohybové. I když plynovodní potrubí jsou v zásadě posuzována jako staticky zatížené trubkové konstrukce, je nutné brát v úvahu i vlivy únavového poškození, respektive nízkocyklovou únavu vlivem kolísání tlaku v síti a vysokocyklovou únavu v okolí kompresorových stanic u VTL plynovodů [3, 4].

## **2 Požadavky na materiálové vlastnosti ocelových trubních materiálů**

### **2.1 Základní požadavky na ocelové trubní materiály a spolehlivost plynovodů**

Vlivem ohromné akumulace energie, vyvozené stlačeným plynem především u rozměrných vysokotlakých plynovodů by mohlo při případné iniciaci porušení materiálu dojít ke vzniku destrukcí katastrofických rozměrů. Proto kromě kladených náročných požadavků na pevnostní vlastnosti je kladen důraz i na vysokou houževnatost ocelí a lomově mechanické charakteristiky.

S růstem nároků na bezpečnost a spolehlivost plynovodů se časem postupně zvyšovaly požadavky na materiálové vlastnosti a kvalitu trubek, dodávaných od výrobců a v současné době jsou určeny technickými předpisy ČSN EN ISO 3183, ČSN EN 1594 a TPG 702 04. Pro stavbu plynovodů do tlaku 16 bar včetně jsou v souladu požadavkem TPG 702 04 používány ocelové trubky kruhového průřezu dle ČSN EN ISO 3183 s označením PSL 1 nebo PSL 2 a



pro provozní tlak nad 16 bar jsou používány dle ČSN EN ISO 3183 PSL 2. Se souhlasem provozovatele lze použít také oceli ekvivalentní dle příslušných materiálových ČSN např. vybrané oceli tř. 11, 12, 13 se zřetelem na provozní tlak plynu a průměr potrubí. Základním požadavkem je dle metodického pokynu provozovatele pro materiál potrubí použití oceli plně uklidněné, se zaručenou mezí kluzu nejméně 235 MPa a se zaručenou svařitelností.

I trubní ocelové konstrukce v plynárenství, určené pro rozvod plynu, vyžadují dostatečnou pevnost, ale zároveň i dostatečnou houževnatost materiálu k zajištění spolehlivého provozu. Ocelové potrubí, které je uloženo v zemi s požadovaným krytím, by nemělo být v běžném provozu a v klimatických podmínkách ČR vystaveno teplotám, klesajícím pod bod mrazu, kdy pokles houževnatosti s klesající teplotou, blížící se bodu mrazu, je ještě přijatelný. V případech, kdy je potrubí uloženo nad zemí např. při přechodech přes vodní toky, se musí brát v úvahu pokles teploty, zejména za zimních atmosférických podmínek, které ovlivňují změny lomově mechanických vlastností materiálu. V zimních podmínkách je dostatečná míra houževnatosti důležitá také pro vlastní výstavbu plynovodů, nebo při odstranění provozních poruch na obnaženém plynovodním potrubí. Význam dostatečné houževnatosti se uplatňuje i při vlastním porušení integrity potrubí, kdy současně při velkém přetlaku plynu v potrubí a úniku plynu dochází vlivem prudkého snižování tlaku k poklesu teploty materiálu kolem defektu a ke změně lomově mechanických vlastností.

V plynovodním potrubí dochází ke kolísání tlaku plynu vlivem rozdílných odběrů v průběhu roku i během dne. Tyto změny provozního tlaku a vyvozené napětí ve stěně trubky je nutno zohlednit především u trubek s případnými defekty. Proto je kladen důraz na kvalitu trubního materiálu nejen z hlediska požadavků na pevnost a houževnatost, ale i na technologické zpracování při výrobě ocelových trubek.

U plynovodů především vysokotlakých, uložených v zemi, je způsob namáhání velmi složitý, který je závislý na povaze a složitosti terénu (dilatacích podkladu a pohybu zemin), na způsobu lokálního zatížení vnějšími silami, způsobu provozování a vystavení korozním účinkům zeminy.

Z výše uvedených důvodů je bezpečnost a spolehlivost ocelových plynovodů podmíněna řadou aspektů, které se v různé výši podílejí na dlouhodobé provozní životnosti a spolehlivosti ocelového plynovodního potrubí. V zásadě lze tyto aspekty rozdělit na následující tři charakteristiky.

***Materiálové charakteristiky***, které jsou dány druhem použité oceli, jejím chemickým složením a z toho vyplývající strukturou, související metalurgickou čistotou, pevnostními a lomově mechanickými vlastnostmi.

**Technologické vlastnosti**, které jsou určeny technologií výroby a zpracování trubek, technologií spojování, respektive svařování trubek při montážní činnosti na stavbách.

**Provozní podmínky**, které jsou reprezentovány zatížením vnitřním přetlakem, nízkocyklovou únavou při kolísání tlaku v síti VTL plynovodů, vysokocyklovou únavou u VTL plynovodů v okolí kompresorových stanic, působením a účinkům korozního prostředí, provozní teplotou v pracovním prostředí [2, 3, 4].

## 2.2 Chemické složení a vliv na svařitelnost ocelí

Dnes je běžnou součástí při dodávce trubek uvedení chemického složení v dodacích materiálových listech, kterými výrobce zaručuje kvalitu trubního ocelového materiálu, mechanické vlastnosti, strukturní a metalurgickou čistotu materiálu. Požadované hodnoty jsou přesně stanovené v normě ČSN EN ISO 3138 a to pro trubky s  $t \leq 25$  mm a nejvyšším obsahem uhlíku v rozmezí hodnot od 0,22 do 0,28 hm. % u trubek s označením PSL 1 a v rozmezí hodnot od 0,16 do 0,24 hm. % při použití trubek PSL 2 v závislosti na příslušné jakosti oceli (PSL 2 pro Evropu dáno v rozmezí hodnot 0,12 až 0,23 hm. % C dle přílohy M).

Velmi významné jsou další dva prvky obsažené v oceli, kterými jsou síra a fosfor. U trubek PSL 1 je u všech jakostí stanoven nejvyšší obsah síry do hodnoty 0,030 hm. % a taktéž nejvyšší obsah fosforu do hodnoty 0,030 hm. %. Pro trubky s označením PSL 2 je podle požadované jakosti oceli stanoven maximální limit obsahu síry v rozmezí hodnot od 0,010 do 0,015 hm. % a současně maximální limit obsahu fosforu v rozmezí hodnot od 0,020 do 0,025 hm. %, v příloze M uvedené evropské požadavky pro trubky PSL 2 jsou v souladu.

Chemické složení také ovlivňuje dobrou svařitelnost oceli, kterou deklaruje tzv. uhlíkový ekvivalent (CEV) a který je dnes již také součástí materiálových atestů. V závislosti na požadované jakosti oceli smí uhlíkový ekvivalent nabývat maximálně do hodnoty 0,45 hm. %. Dalším významným materiálovým požadavkem je použití tzv. uklidněné oceli, která charakterizuje stupeň dezoxidace oceli, respektive požadované snížení obsahu kyslíku. Tímto požadavkem je docíleno významné potlačení projevů stárnutí a křehnutí oceli v místech případného vzniku plastické deformace za studena.

V českém technickém předpisu TPG 704 02 se uvádí, že pro trubky se volí uhlíkový ekvivalent v souladu s ČSN EN ISO 3183 PSL 2, který činí hodnotu max. 0,43 hm. % a pro ostatní součásti plynovodu platí požadavky evropské normy ČSN EN 1594 [2, 3, 4, 5].

## 2.3 Struktura a vlastnosti používaných ocelí

Pro realizaci výstavby potrubních rozvodů plynu jsou nejčastěji používány nízkouhlíkové nelegované a nízkolegované (mikrolegované) oceli, normalizačně žíhané

vykazující feriticko-perlitickou strukturou. Pro výstavbu dálkových magistralních a tranzitních VTL plynovodů lze použít kromě tepelně zpracovaných trubek normalizačním žíháním i termomechanicky zpracované trubní ocelové materiály, které mohou vykazovat dvoufázovou austeniticko-feritickou, bainiticko-feritickou, případně martenziticko-feritickou strukturu. Výhodou termomechanicky zpracovaných ocelí je dosažení zvýšení pevnostních vlastností meze kluzu a meze pevnosti při současném zachování příznivé houževnatosti a teplotního tranzitního chování. Přínosem také je, že princip zpracování a získané materiálové vlastnosti u termomechanicky zpracovaných ocelí umožňuje snížení obsahu uhlíku, díky čemuž tyto oceli následně vykazují nižší uhlíkový ekvivalent a z toho vyplývající výbornou svařitelnost. Obě používané skupiny materiálů dle příslušné jakosti splňují požadované pevnostní, plastické a lomově mechanické vlastnosti [3, 4].

## **2.4. Tepelné a tepelně deformační zpracování a vliv na vlastnosti ocelí**

Trubní ocelové materiály, určené pro rozvody plynu v plynárenství mohou být používány v normalizačně žíhaném nebo termomechanicky zpracovaném stavu [3].

### **2.4.1 Normalizačně žíhané jemnozrné oceli**

Normalizační žíhání je druh tepelného zpracování materiálů, jehož princip spočívá v ohřevu ocelového materiálu o 20 až 50 °C nad teplotu  $A_{c3}$  ( $A_{cm}$ ), což je ohřev do oblasti stabilního austenitu, následuje nutná prodleva a poslední fází je pozvolné ochlazení na vzduchu. Výsledkem je po předchozím zpracování zrovnoměnění struktury, odstranění případných vnitřních pnutí a vytvoření jemnozrné struktury. Konečnou strukturu u nízkouhlíkových a nízkolegovaných (mikrolegovaných) ocelí představuje jemnozrná směs feritu a perlitu v závislosti na obsahu uhlíku dané oceli. Takto tepelně zpracovaná ocel následně vykazuje i vyšší pevnostní vlastnosti a současně dobré plastické vlastnosti.

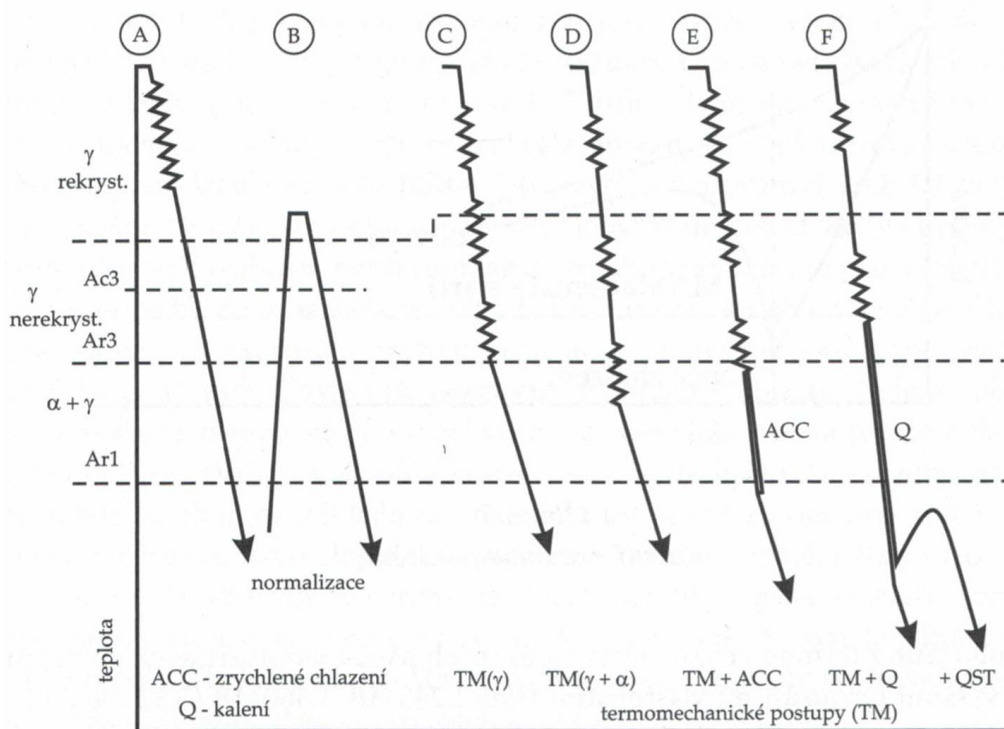
U normalizačně žíhaných ocelí je zvýšení pevnostních vlastností limitováno obsahem uhlíku, protože vždy musí být bez potíží zaručena svařitelnost ocelí, kdy jako mezní hranice je považován obsah uhlíku ve výši 0,23 až 0,24 hm. %. Zajímavou alternativou, která se nabízí k dosažení zvýšení meze kluzu oceli, je zjemnění feritického zrna s využitím mikrolegur Nb, Ti, Al, případně V a Mo. Během tváření mikrolegura Nb brzdí rekrytalizační procesy v austenitické oblasti. Karbonitridy, nitridy a karbidy mikrolegur, vznikající v procesu chladnutí po tváření za tepla, zabraňují nárůstu feritického zrna při následující rekrytalizaci z austenitu na ferit. Výsledkem je vznik jemnozrné struktury, která vykazuje jak zvýšenou mez kluzu, tak současně i vyšší houževnatost [3, 4, 6].



## 2.4.2 Termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli

Termomechanicky zpracované oceli jsou další významnou skupinou ocelí v oblasti rozvodu plynů. Základním principem termomechanického zpracování je současné tepelné a deformační zpracování, které spočívá v řízení změn mikrostruktury během deformace za tepla a při ochlazování, kdy deformace dle uskutečněného typu zpracování může být vložena před, během a nebo po austenitické transformaci. Současně se jedná o oceli s vyšším obsahem Mn, ale nižším obsahem C a obsahující komplexní mikroleguru Nb, V, Ti, Al, případně Mo. Typově je lze považovat za moderní variantu HSLA (High Strength Low Alloy) ocelí s vysokou pevností a s nízkými obsahy legujících prvků.

Při termomechanickém zpracování (TMP) probíhá řízený postup válcování pásů za tepla, případně se zrychleným ochlazováním (TMCP) pásu v oblasti  $Ar_3$  a  $Ar_1$  a to s definovaným úběrem a sledem válcovacích stupňů tak, aby po fragmentaci zrn, které tváření poskytuje, nedošlo k úplné rekrytalizaci struktury a následně k jejímu zhrubnutí, současně se na proces rekrytalizace využívá i brzdicí vliv mikrolegury Nb. Postupně dochází při tváření ke zjemnění zrna nejen v oblasti tvořené pouze austenitem (obr. 1 – postup C), ale i případně v oblasti výskytu dvoufázové struktury austeniticko-feritické (obr. 1 – postup D) mezi teplotami  $Ac_3$  a  $Ac_1$ , případně  $Ar_3$  a  $Ar_1$ , kdy v druhém případě dochází při tváření nejen ke zjemnění zrna, ale také k dislokačnímu zpevnění vlivem částečné plastické deformace struktury za studena.



Obr. 1: Přehled postupů při válcování plechů pro svařované trubky [3]

U pásů větší tloušťky se k dosažení vyšších hodnot meze kluzu využívá postupů E a F (obr. 1), kdy se kromě uvedeného termomechanického zpracování zavádí ve fázi ochlazování zrychlené ochlazování vodou (ACC). U postupu F proběhne rychlé ochlazování, kalení (Q) až do oblasti martenzitické přeměny (pod  $M_s$ ) s krátkým přerušením ochlazování, kdy se využívá účinek samopopouštění (QST). Výsledkem zrychleného ochlazování je směsná struktura feriticko-bainitická, případně nízkouhlíková popouštěná feriticko-martenzitická struktura.

V roce 1998 byl vyvinut nový koncepční proces termomechanického zpracování (dále jen nekonvenční TMCP), jehož cílem je získat nejen vysokou pevnost transformačním zpevněním, ale také vysokou houževnatost zušlechťením transformované mikrostruktury, což má za následek kombinaci oceli s vysokou pevností a vysokou houževnatostí s redukováným obsahem legujících prvků. Mikrostruktura je tvořena bainitickou maticí a jemně dispergovanou martenzit-austenitovou složkou (M/A) jako druhé fáze s objemovým podílem nad 7 %. Tento proces se skládá z pokročilého zrychleného chladicího zařízení, jehož účelem je dosažení nejvyšších rychlostí chlazení a ze zařízení pro indukční ohřev, určené pro on-line proces tepelného zpracování (HOP) s vysokým tepelným výkonem pro ohřev tlustých plechů (pásů) až do tloušťky 40 mm. Tato procesní kombinace umožňuje dosáhnout nového metalurgického kontrolního procesu, kterého nelze dosáhnout konvenčním TMCP. V konvenčním procesu TMCP dochází k řízenému válcování, zrychlenému ochlazení s následným dokončením ochlazení na vzduchu. Na druhé straně, v netradičním procesu TMCP se ocelový plech (pás) rychle ohřívá indukčními cívkami ihned po zrychleném chlazení a následuje ochlazení na vzduchu. Oba způsoby TMCP jsou prováděny za přísně řízených a relativně nízkých teplot, tj. v oblasti nerekrystalizovaného austenitu mezi teplotou  $A_{c3}$  a teplotou  $A_{r3}$  za účelem vytvoření velmi jemných zrn. Přesněji, poslední kroky válcování za tepla jsou prováděny pod teplotou rekrystalizace austenitu. Výsledkem je, že silně deformovaná „palačinková“ austenitová zrna zcela nerekrystalizují, což poskytuje velké množství nukleačních míst pro transformaci austenitu na ferit nebo bainit. Zkoumání podmínek zrychleného ochlazení (ACC) uvádí, že snížení obou startovacích a zastavovacích teplot podporuje tvorbu feritových resp. M/A složek.

Moderní vysokopevnostní trubní oceli, schopné plnit nejnáročnější provozní požadavky, by nemohly být vyráběny bez použití jedinečně důležitého prvku niobu. Niob vytváří nezastupitelnou roli během konvenčního termomechanicky řízeného zpracování (TMCP) a vysokoteplotního zpracování (HTP). Niob je jediným prvkem, který umožňuje válcování při vyšších teplotách, než je obvyklé, čímž se zabrání režimům zpracování austenitu při nižších teplotách, které zvyšují zatížení válců, snižují produktivitu a zvyšují opotřebení

zařízení. Navíc niob zpomaluje rekrystalizaci, regeneraci a následně snižuje počáteční teplotu transformace austenitu na ferit. Tento metalurgický „zázrak“ jedinečně produkuje bainiticko-feritickou mikrostrukturu, která poskytuje oceli vysokou pevnost a houževnatost.

Konvenční i nekonvenční procesy TMCP se ukázaly být účinnými způsoby zpracování, které umožňují vyrábět oceli, které poskytují výborné pevnostní vlastnosti s nižším poměrem smluvní meze kluzu a meze pevnosti, s vyšší tažností a dostatečnou houževnatostí [3, 4, 7-10].

## **2.5 Výrobně technologické vlivy**

K výrobně technologickým vlivům při výrobě trubek a z toho vyplývajících vad lze jmenovat zejména vnitřní pnutí z výroby, ovalitu trubek, defekty výrobního svaru, zdvojení tloušťky stěny, defekty na vnitřním i vnějším povrchu trubek, lokální místa se zvýšenou tvrdostí oceli.

Obecně nejslabším místem je povrch trubek, protože je zdrojem většiny poruch a proto materiálové vady na povrchu trubek jsou považovány za důležité. Povrchová vrstva vykazuje horší strukturu, často je oduhličena, vykazuje nejnižší mez kluzu a zpravidla vykazuje nejvyšší strukturní a makroskopické vnitřní pnutí, tudíž je nejvíce náchylná na účinky koroze. [3, 4].

### **2.5.1 Bezešvé trubky**

Ve větším rozsahu se uplatňují u potrubí menších průměrů do 300 mm, případně středních průměrů do 500 mm. U potrubí větších průměrů jsou vytlačovány trubkami svařovanými a to především z ekonomických důvodů a v současné době konkurují podélně svařované trubky bezešvým trubkám válcovaným za tepla u průměrů menších od 100 mm do 500 mm.

Jejich nedostatky představuje vyšší kolísání tloušťky stěny po obvodě trubky i délce trubky, dodržování tolerance průměrů na koncích trubek a dodržení ovality potrubí. Tyto nedostatky mohou následně způsobit potíže při montážním svařování na staveništi. Vlivem technologie výroby může docházet ke vzniku převalků a přeložek, které mohou být s obtížemi zjištělné. Při výrobě mohou vznikat vnitřní pnutí, která souvisí s dodržováním požadovaného teplotního režimu doválcování a finálního chladnutí. Vysoké úrovně povrchových pnutí mohou vzniknout při doválcování za nižších teplot, kdy dochází ke zpevňování povrchu trubky a která jsou nežádoucí z hlediska náchylnosti oceli ke korozi pod napětím. Zařazením normalizačního žíhání do procesu výroby lze dosáhnout určité stabilizace. Ve fázi doválcování je častým přirozeným nedostatkem možnost oduhličení

povrchů a výskyt drobných povrchových necelistvostí. Mezi další známé vady, které se mohou vyskytnout lze označit tzv. pleny, které jsou ale zaručitelně zjistitelné jen provedením nedestruktivní kontroly na zdvojení stěny. U výrobce výstupní tlakovou zkouškou nebo tlakovou zkouškou po ukončení montážních prací nemusí být vada zjištěna, pouze pomocí zkoušky nazývané stresstest, která je schopna vyvolat otevření potrubí, případně reálný únik zkušebního media.

Zkouška stresstem nebo-li napěťová zkouška představuje technologickou operaci a současně hydraulickou tlakovou zkoušku po ukončení montážních prací, na již dokončeném, položeném a zasypaném potrubí, která se provádí za účelem jak odstranění výrobně-montážních vnitřních pnutí ve stěně potrubí, tak i odstranění vlivu geometrických nedokonalostí (imperfekcí) a koncentrátorů napětí v oblasti případných ostrých defektů pomocí plastických deformací v okolí hodnoty meze kluzu [2, 3, 4].

### **2.5.2 Podélně a spirálovitě svařované trubky**

Kvalita svařovaných trubek v současné době je v porovnání s bezešvými trubkami válcovanými za tepla vzhledem k technologiím svařování a k zavedeným výrobním kontrolám jakosti svarů plně srovnatelná nebo vyšší. Výhodou svařovaných trubek je, že vykazují menší odchylky vnitřních koncových průměrů u trubek větších dimenzí a menší odchylky v průběžné délce i v tloušťce stěny, což je výhodné zejména při montážním svařování na stavbách. Určitým nedostatkem je vyšší úroveň pnutí, kterou je nutné ve svařovaných trubkách brát v úvahu, což se může v konečném důsledku při větším zatížení nepříznivě projevit vznikem plastické deformace. U výrobce provedená výstupní hydraulická zkouška jen s krátkou dobu zatížení není schopna vnitřní pnutí eliminovat a mohou přetrvávat ve stěně ocelového potrubí i po několikaletém provozu. Technologickou operací stresstem nebo normalizačním žíháním lze dosáhnout jejich snížení, nicméně realizace normalizačního žíhání u každé trubky není příliš efektivní a většinou se nepoužívá.

V případě ocelí se zvýšenou mezí kluzu je nutné brát v úvahu, že výsledná pnutí vzniklá z výroby budou s mezí kluzu narůstat, stejně tak jako pnutí od montážních obvodových svarů potrubí při montážně svařečských pracích na trasách staveb. Následně pak mohou výsledná napětí po superpozici s namáháním provozním dosahovat nebezpečně vysokých hodnot.

U termomechanicky zpracovaných ocelí nelze využít ke snížení pnutí žíhání, jelikož by to vedlo k degradaci příznivých vlastností, které přináší termomechanické zpracování. Z těchto důvodů je využití stresstestu, respektive tlakování trubek až do vzniku plastických

deformací v místech s vysokou úrovní pnutí důležitou metodou, vedoucí ke snížení pnutí, kterou lze využít již u výrobce trubek, nebo po dokončení montáže potrubí na trasách staveb. Při tlakové zkoušce dochází ke skládání namáhání od přetlaku zkušebního media a vnitřního pnutí ve stěně potrubí. Jestliže v kritických místech výsledné napětí překročí mez kluzu materiálu, dojde v těchto místech k odbourání špiček napětí vzniklou plastickou deformací a následně ke snížení pnutí, včetně jejich přerozdělení (redistribuce) [3, 4, 11].

## 2.6 Mechanické vlastnosti

### 2.6.1 Pevnostní a plastické vlastnosti

#### *Mez kluzu (mez „flow stress“) a mez pevnosti*

Pro projektování plynovodu představuje výrobcem deklarovaná mez kluzu trubního materiálu nejdůležitější projektovou hodnotu. K základním garantovaným požadavkům u ocelových trubek jak bezešvých tak i svařovaných patří minimální hodnota  $R_e$  ( $R_{eH}$ ) u ocelí s výraznou mezí kluzu nebo stanovení  $R_{t0,5}$ , případně  $R_{p0,2}$  u ocelí s nevýraznou mezí kluzu a stanovení meze pevnosti  $R_m$  daného ocelového materiálu. Nevýrazná mez kluzu s označením  $R_{t0,5}$  odpovídá celkové deformaci 0,5 % a s označením  $R_{p0,2}$  odpovídá 0,2 % trvalé deformace, rozdíly mezi hodnotami  $R_{t0,5}$  a  $R_{p0,2}$  u potrubních ocelí jsou minimální.

Významná hodnota, která není standardy zaručena, ale používá se v elasto-plastických lomově mechanických výpočtech, se nazývá mez „flow stress“ ( $R_{fs}$ ). Jedná se o důležitou výpočtovou veličinu, která charakterizuje mezní stav oceli po překročení meze kluzu ( $R_e$ ) a využívá se jako ještě přípustná deformační mez oceli místo hodnoty meze kluzu ( $R_e$ ). Z hlediska strukturního chování oceli odpovídá stavu, kdy při rozvoji plastické deformace již nastává oddělování křehkých inkluzí např. karbidů, oxidů, sulfidů od ocelové matrice, čímž dochází ke vzniku prvních drobných necelistvostí.

Výběr oceli s vyššími pevnostními vlastnostmi nemusí být vždy přínosné jako např. v případě vysokotlakých plynovodů s provozním tlakem do 4,0 MPa a do průměrů trubek 500 mm. Zeslabení stěny, které lze výpočtem materiálově dosáhnout v těchto případech, nelze stejně většinou využít, neboť je limitováno jinými zásadními požadavky jako je deformační stabilita potrubí proti působení hmotnosti zeminy při zásypu, samotná přeprava a manipulace s trubkami, ale souvisí i s korozními účinky prostředí a potížemi při svařování na staveništích. Oceli s vyšší pevností mohou vykazovat větší citlivost na vruby a korozní napadení [3, 4].

#### *Tažnost*

Významnou uváděnou hodnotou výrobcem trubek, která charakterizuje přetvárné schopnosti, respektive rezervy deformační schopnosti oceli, je tažnost A i hodnota poměru

$R_{t0,5}/R_m$ . Tento poměr je velmi důležitá hodnota při deformačním zatížení trubky během provádění tlakové zkoušky nebo napětíové zkoušky (stresstest) [3, 4].

## 2.6.2 Lomově mechanické vlastnosti

### *Vrubová houževnatost*

Významné informace k posouzení chování trubních ocelí v podmínkách porušování sděluje materiálová charakteristika vrubová houževnatost. Rozhodující při posuzování kvality dodaných ocelových trubek jsou nejnižší hodnoty nárazové práce KV [J], nebo vrubové houževnatosti KCV [ $J/cm^2$ ]. V souladu s normou ČSN EN ISO 3183 jsou rozhodující výrobcem deklarované hodnoty nárazové práce KV při 0 °C, které se využívají pro plynovody uložené v zemi vzhledem k provozní teplotě. U významných úseků plynovodů, které se provozují při atmosférických podmínkách a teplotách, by měly být součástí materiálové dokumentace úplné přechodové závislosti KV (KCV) na teplotě, což poskytne důležité informace o záloze chování oceli v oblasti křehkého porušování v daných teplotních podmínkách. Doplnující informací k naměřeným hodnotám KCV, která charakterizuje porušování oceli a lze ji jednoduše ze zkoušek získat, je zejména podíl tvárného lomu na přeražených vzorcích a plastické rozšíření vzorků [3, 4].

### *Lomová houževnatost*

Hodnocení lomové houževnatosti není dosud podmíněčně zahrnuto do materiálových listů výrobce trubního materiálu. Při konkrétním posuzování vlivu vad v daném trubním materiálu je však nezastupitelné a vyhodnocení zkoušek může poskytnout důležité charakteristiky a významně doplnit, nebo korigovat hodnocení vhodnosti trubních ocelí, které byly získány na základě zkoušek vrubové houževnatosti.

Pomocí lomové mechaniky je možné zhodnotit nebezpečnost případných vad a defektů ve stěně potrubí a ve svarových spojích. Lomově mechanické vlastnosti materiálu vyjadřují jeho odpor vůči lomu, respektive nárůstu trhliny. Tento odpor lze vyjádřit kritickými hodnotami lomově mechanických veličin a to faktorem intenzity napětí  $K_I$  v případě křehkého chování materiálu, a rozevřením v kořeni trhliny  $\delta$  nebo *J-integrálem* při tvárném chování materiálu. Plynovody jsou většinou zhotoveny z tvárných materiálů, pro které je charakteristická rozvinutá plastická oblast na čele trhliny před lomem, proto je nutné k predikci lomu použít elasto-plastické lomové parametry. Lomová houževnatost materiálu potrubí vzhledem k jeho tenkostěnnosti se vyjadřuje v podmínkách rovinné napjatosti  $K_c$ . Zkouškou lomové houževnatosti získané hodnoty jsou závislé na složení materiálu a jeho



struktuře, přičemž jsou snižovány vlivem škodlivých prvků síry a fosforu a vlivem působení vodíku.

Mezi nejvíce nebezpečný typ materiálových vad patří výskyt trhlin. Směrově jsou nejnebezpečnější podélné trhliny, jelikož tyto trhliny jsou otevírány obvodovým napětím ve stěně trubky a pro daný vnitřní přetlak media vykazuje nejvyšší hodnoty lomových parametrů ( $K$ ,  $J$ , nebo  $\delta$ ) v porovnání se stejně dlouhými trhlínami jiných směrů. V oblasti montážních obvodových svarů se mohou vyskytnout obvodové trhliny, které jsou otevírány osovým napětím, které je dvakrát až třikrát menší než obvodové napětí. Při výskytu trhlín je důležitá nejen povrchová délka trhlín, ale především jejich hloubka. K porušení ligamentu pod trhlínou může nastat lomem při dosažení kritické hodnoty řídicího lomového parametru (např.  $K_c$ ), nebo ztrátou plastické stability u tvárnějších ocelí s vysokými hodnotami lomové houževnatosti. V případech, kdy je houževnatost materiálu potrubí vysoká a neprůchozí trhlina není příliš hluboká, stává se lomové napětí závislé na mezi „flow stress“ a přestává záviset na houževnatosti dané oceli, tudíž lom potom nastává v důsledku ztráty plastické stability (ztráty stability plastické deformace) ligamentu.

V případě výskytu zejména podélné trhlíny musí být odolnost plynovodního potrubí vůči lomu zajištěna ve třech rovinách:

1) Inicie lomu – musí být splněna podmínka, aby řídicí lomový parametr nepřesáhl pro uvažovanou trhlínu kritickou hodnotu (lomovou houževnatost při rovinné napjatosti  $K_c$ ). Pokud hodnota řídicího lomového parametru např. faktoru intenzity napětí  $K$  v nejhlubším místě dosáhne kritickou hodnotu  $K_c$ , dojde k protržení ligamentu, nastává lom, jehož důsledkem je vznik průchozí trhlíny.

2) Kritérium „LBB“ (Leak before Break) vyjadřuje termín „dříve teče než praská“ – musí být zajištěno, aby v případě kdy není splněna předchozí podmínka, to znamená iniciace lomu a proděravění stěny trhlínou nebo protržení ligamentu povrchové neprůchozí trhlíny, nedošlo k nestabilnímu šíření již vzniklé průchozí trhlíny po délce potrubí.

3) Kritérium zastavení běžícího lomu – musí být zajištěno, aby i v případě porušení nebo selhání kritéria nedošlo k nekontrolovanému šíření trhlíny na velkou vzdálenost, ale aby se trhlina zastavila na jedné nebo několika trubních délkách [3, 4, 12, 13].

### ***Rázové zkoušky velkých těles (DWTT)***

Rázové zkoušky na velkých tělesech slouží pro hodnocení lomového chování potrubních ocelí a používají se pro stanovení přechodové teploty plechů skutečné tloušťky, používaných zejména na svařovaná tlaková potrubí jako jsou plynovody a to včetně oblasti svarových spojů. Zkoušky DWTT (Drop Weight Tear Test) představují rázové zkoušky

padajícím závažím na rozměrných tělesech s vylišovaným vrubem a s tloušťkou rovnou tloušťce stěny trubky o rozměrech 75 x t x 350 mm. Výzkumnými experimenty byl zjištěn dobrý vzájemný vztah charakteru lomů při zkouškách na velkých zkušebních tělesech s charakterem lomů na skutečném potrubí. Proto je rozhodujícím požadavkem podíl tvárného lomu na přeraženém zkušebním tělese pro příslušnou teplotu. Podle normy ČSN EN ISO 3183 se požaduje, aby při teplotě 0 °C byl dosažen podíl tvárného lomu na zkušebním tělese 85 %. U trubek s vyšší pevností ( $R_e \geq 360$  MPa) jsou tyto zkoušky důležitou součástí dodacích materiálových listů výrobce trubek.

Svarové spoje a jejich tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu jsou potencionálním místem porušení svařovaných konstrukcí, protože svarové spoje mohou obsahovat různé defekty jako např. trhliny, neprůvary, bubliny apod. Experimentálně byla na uhlíkové mikrolegované oceli zjištěna hodnota DWTT = -30°C, na kvalitním svaru 0°C a na vadném svaru +30°C, z čehož vyplývá, že odolnost proti křehkému porušení pro svařované konstrukce je určena přednostně jakostí a vlastnostmi provedených svarových spojů. Vynaložená energie na vznik lomu s ohledem na ostrý vylišovaný vrub a zpevnění materiálu bude nízká. Na šíření trhliny se použije hlavní část spotřebované energie, proto tuto zkoušku lze považovat za zkoušku odolnosti proti šíření trhliny [3, 4, 12, 13].

## **2.7 Požadavky provozovatele distribuční a přepravní soustavy pro ocelové plynovody**

### **2.7.1 Požadavky pro výstavbu a rekonstrukce NTL a STL plynovodů**

Nová výstavba, rekonstrukce a opravy stávajících NTL, STL plynovodů a přípojek u místních sítí se z ocelových materiálů dle požadavku provozovatele provádí jen výjimečně, a to pouze v technicky odůvodněných případech jako např. opravy stávajícího ocelového plynovodu, požadavek nadzemního vedení nebo požadavek velké dimenze. Je to dáno tím, že se u místních sítí s menšími provozními tlaky a tudíž i s menšími nároky na mechanickou pevnost plně využívá již léta osvědčené trubní materiály z polymerních materiálů a to polyetylenu, jehož zásadní předností, kromě jiného, je korozní odolnost.

Požadavky na trubní ocelové materiály, určené pro stavbu plynovodů a souvisejících kompletačních prvků jsou stanoveny v technickém předpisu TPG 702 04 v návaznosti na normu ČSN EN ISO 3183.

Základním požadavkem je použití trubního materiálu, vyrobeného z oceli výhradně plně uklidněné se zaručenou mezí kluzu o hodnotě nejméně 235 MPa a se zaručenou svařitelností.

Požadavky na chemickou čistotu ocelového materiálu jsou dány součtem obsahů prvků S+P (síra s fosforem) do maximální výše 0,050 hm. %. Další ověřovanou hodnotou je uhlíkový ekvivalent (CEV), kterým se vyjadřuje dobrá svařitelnost a jeho nejvyšší hodnota je stanovena na 0,45 hm. %. Pro související kompletační prvky platí, že jejich materiál musí mít srovnatelné vlastnosti jako trubní materiál.

Technickým požadavkem (Metodickým pokynem) jsou pro plynovody doporučeny následující materiály v souladu s příslušnými normami a jakostí:

dle ČSN EN ISO 3183, příloha L – L210, L245, L290 pro PSL 1 a L245N, L290N pro PSL 2  
dle příslušných materiálůvých ČSN – 11 353.1, 11 373.1, 11 378.1, 12021.1, 12022.1

Dodavatel trubek a kompletačních prvků musí odběrateli poskytnout dokumenty kontroly dle ČSN EN 10204, označené buď jako Zkušební zpráva 2.2 nebo Inspekční certifikát 3.1 [14].

### **2.7.2 Požadavky pro výstavbu a rekonstrukce VTL plynodů**

Pro trubky a související kompletační prvky, určené pro výstavbu, rekonstrukce a opravy plynodů a přípojek je požadována ocel plně uklidněná, jemnozrnná a zaručeně svařitelná. Plynovody s provozním tlakem do 40 bar musí vykazovat minimální zaručenou mez kluzu  $R_e \geq 235$  MPa, pro plynovody nad 40 bar do 100 bar je požadována mez kluzu  $R_e \geq 360$  MPa. Nejvyšší hodnota uhlíkového ekvivalentu (CEV) je dána požadavkem normy ČSN EN ISO 3183, dle přílohy M. V příloze M jsou uvedeny jeho hodnoty podle jakosti oceli v rozmezí hodnot 0,4 – 0,43 hm. %, což platí při obsahu  $C > 0,12$  hm. % ( $CEV = CE_{IIW}$ ). Při obsahu  $C \leq 0,12$  hm. % je hodnota CEV stanovena na 0,25 hm. % ( $CEV = CE_{pcm}$ ). Chemická čistota je požadována v souladu s ČSN EN ISO 3183, příloha M, tabulka M.1, ve které je obsah uhlíku stanoven podle jakosti oceli v rozmezí maximálních hodnot 0,12 až 0,23 hm. %. Nejvyšší obsah síry je omezen na hodnotu 0,015 hm. % a nejvyšší obsah fosforu na hodnotu 0,025 hm. %, což platí u ocelí všech jakostí. Uvedené hodnoty chemického složení a CEV jsou platné pro trubky s  $t \leq 25$  mm dle přílohy M.

Použité trubní oceli a kompletační prvky musí splňovat požadavky základních technických předpisů TPG 702 04, ČSN EN 1594 a ČSN EN ISO 3183 (příloha M), dále např. předpisů TPG 936 02 a ČSN EN 14870-1, týkajících se trubních ohybů. Mechanické vlastnosti a chemická čistota ocelí, určených pro kompletační materiály musí vykazovat hodnoty jednoznačně ekvivalentní trubním ocelím. Pro VTL plynovody se používají trubní materiály dle mezinárodního a evropského značení od minimální požadované jakosti L245NE/ME (obr. 2, 3) po vyšší jakost např. L360NE/ME, L415NE/ME.

Pro materiály trubních ocelí jsou požadovány zkoušky vrubové houževnatosti dle ČSN EN ISO 3183, příloha G. Pokud materiál trubek současně splňuje podmínky  $D \geq 500$  mm,  $T \geq 8$  mm a  $R_{\text{emin}} \geq 360$  MPa budou provedeny zkoušky DWT dle ČSN EN ISO 3183, příloha G. Pro trubky, které jsou určeny pro plynovody uložené v zemi, je požadováno, aby obě zkoušky byly vykonány při 0°C. Pro trubky, určené pro nadzemní uložení plynovodu je požadováno provedení těchto zkoušek při -30°C.

U kompletačního materiálu, který je určen ke svařování je přípustné použít materiál jednoznačně ekvivalentní, musí vykazovat srovnatelné mechanické vlastnosti s trubním materiálem a zaručenou svařitelnost. Výchozí materiál, určený pro ohyby a který je vyráběn tvářením za tepla (např. indukčním ohřevem) se nově již nesmí použít ocel termomechanicky zpracovaná, jelikož při ohřevu nad 580°C může dojít k poklesu mechanických vlastností. V době nedávné (do ledna 2017) její použití bylo pouze nedoporučeno a v případě použití musely být splněny určité podmínky, které požadovaly zohlednění možného poklesu mechanických vlastností trubky a to volbou přiměřeně vyššího pevnostního stupně oceli. Současně muselo být prokázáno výrobcem ohybů a to materiálovou zkouškou v místě ovlivnění materiálu indukčním ohřevem, že použitou indukční teplotou při výrobě ohybu nedošlo k degradaci mechanických a lomových vlastností trubky.

Povinností dodavatele trubek a kompletačních prvků je poskytnutí odběrateli dokument kontroly inspekční certifikát min. 3.1 dle ČSN EN 10204 [5, 15].



*Obr. 2 a 3: Ocelový svařenec VTL armaturního uzlu provedený dílenským způsobem z trubního materiálu jakosti L245NE/ME a jeho zabudování v trase (foto autor)*

#### ***Volba typu trubek dle způsobu výroby***

Jako trubní materiál pro výstavbu plynovodů se používají následující trubky v souladu s normou ČSN EN ISO 3183 a to ve výrobním provedení jako:

- bežešvé (S)
- vysokofrekvenčně podélně svařované (HFW)
- obloukově nebo kombinovaně podélně svařované (SAWL, COWL)
- obloukově nebo kombinovaně šroubovicově svařované (SAWH, COWH)

Použití jednotlivých typů trubek je v zásadě rovnocenné. Pouze pro kombinaci různých typů trubek, které budou následně podrobeny zkoušce stresstestu, platí určitá omezení. Různé typy výrobního provedení trubek není vhodné kombinovat. Nedoporučuje se především kombinace podélně svařovaných expandovaných trub za studena s ostatními typy trubek [15].

## 2.8 Požadavky na svařitelnost ocelových a trubních materiálů

Svařitelnost obecně vyjadřuje komplexní charakteristiku materiálu, která určuje technickou vhodnost materiálu pro vytvoření svarového spoje požadované jakosti za daných podmínek svařování. Svařitelnost závisí na řadě činitelů a lze ji členit na svařitelnost metalurgickou, konstrukční a technologickou.

**Svařitelnost metalurgická**, která vyjadřuje vhodnost kovu ke svařování, zajišťuje chemické složení základního a přídavného materiálu, metalurgické faktory výroby (jakost a čistota surovin, způsob výroby), způsob lití a tváření (odlišná struktura, homogenita i vlastnosti), tepelné zpracování součástí před svařováním.

**Svařitelnost konstrukční**, tzn. konstrukční spolehlivost svarového spoje, která je specifikována tloušťkou materiálu (stav napjatosti a velikost odvodu tepla ze svarového spoje), tvarem svaru a svarových ploch, tuhostí svarového spoje, rozložením a počtem svarů v závislosti na způsobu a velikosti namáhání svařované konstrukce.

**Svařitelnost technologická**, vyjadřující technologickou možnost svařování, která je dána způsobem svařování (množství tepla vneseného do svaru, promísení základního a přídavného materiálu), přídavným materiálem (chemické složení), měrným tepelným příkonem svařování, postupem svařování s ohledem na deformace a vnitřní pnutí, předehřevem před svařováním, dohřevem a tepelným zpracováním svarku.

Z hlediska vlivu chemického složení všechny prvky více či méně ovlivňují svařitelnost, nejvýznamnějším a tudíž sledovaným prvkem je uhlík, který podstatně ovlivňuje svařitelnost. Mezi další důležité prvky patří také síra, fosfor, měď, nikl, chrom, dále to jsou plyny jako kyslík, dusík a vodík. Vliv přísadových a doprovodných prvků se vyjadřuje jejich poměrným účinkem tzv. **uhlíkovým ekvivalentem (Ce)** např. podle výpočtu IIW :

$$Ce = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad [\%] \quad (1)$$

Tento vztah se používá pro nelegované, jemnozrnné a nízkolegované oceli. Pokud je hodnota uhlíkového ekvivalentu  $Ce \leq 0,50 \%$  a současně obsah uhlíku  $C \leq 0,22 \%$  lze ocel svařovat bez zvláštních technologických opatření. Při případném vyšším obsahu uhlíku a hodnotě uhlíkového ekvivalentu se musí provést před svařením předehřev na teplotu 100 až 250 °C u uhlíkových ocelí třídy 11 a 12. Z hlediska svařitelnosti se u ocelí uplatňuje zásada, že uhlíkové oceli s obsahem  $C < 0,22 \%$  a při tloušťce do 25 mm mají tzv. zaručenou svařitelnost (při větší tloušťce by bylo nutno ocel předehřát na teplotu 100 až 250°C). Používané ocelové trubní materiály pro rozvod plynu splňují obě tyto podmínky (obsah  $C < 0,22 \%$  a tloušťku do 25 mm).

**Zaručená svařitelnost** znamená, že výrobce zaručuje svařitelnost oceli při svařování do 0°C bez zvláštních opatření. Při svařování pod 0°C zaručuje výrobce svařitelnost oceli jen při dodržení určitých opatření, které snižují rychlost ochlazování svařovaných spojů jako např. předehřev a dohřev po svařování.

**Hodnocení svařitelnosti** vyjadřují dvě skupiny ukazatelů, které jsou nazývány jako ukazatelé celistvosti svarových spojů a ukazatelé vlastností svarových spojů.

**Ukazatelé celistvosti svarových spojů** charakterizují odolnost svarových spojů proti vzniku trhlin a dalších nepřípustných vad, což vyjadřuje odolnost proti praskavosti (trhlinám) za tepla, odolnost proti praskavosti za studena, odolnost proti žíhací praskavosti, odolnost proti lamelární praskavosti.

**Ukazatelé vlastností svarových spojů** představují svarový spoj, vyhovující provozním podmínkám a charakterizují změny vlastností materiálu v důsledku svařování a patří k nim především pevnost v tahu svarového spoje, tvrdost svarového spoje, vrubová houževnatost (nárazová práce) tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu.

Svařovací parametry, jako jsou rychlost svařování, přívod tepla a podmínky svařování rovněž ovlivňují vlastnosti svarových spojů. Mechanické vlastnosti svarových spojů jsou také ovlivněny složením svarového kovu a použitou metodou svařování [16, 17].

### 3 Technologie a metalurgický proces svařování

#### 3.1 Volba a popis metody tavného svařování

Definice svařování kovů dle ČSN 05 0000 charakterizuje svařování kovů jako metalurgický proces, při kterém se vytvářejí nerozebíratelná spojení prostřednictvím meziatomových vazeb mezi svařovanými částmi přímo nebo prostřednictvím přídavného materiálu při jejich ohřevu nebo plastické deformaci.



Při tavném způsobu svařování dochází ke spojení svarových ploch základních materiálů lokálním natavením bez použití tlaku nebo rázů. Současně se obvykle používá přídavný materiál stejného nebo velmi podobného chemického složení jako má základní materiál a takto roztavený materiál tvoří tavnou lázeň. Ve velmi malém objemu taveniny v těsném spojení s tuhým základním kovem probíhá krystalizace, přičemž rozmezí teplot mezi likvidem a solidem je velmi úzké. Svařované díly by měly být přednostně vyrobeny ze stejných základních materiálů, nejlépe se zaručenou svařitelností. Před provedením svarového spoje je většinou nutné provést úpravu svarových ploch, která se provádí většinou mechanickým způsobem (obráběním např. broušením).

Působením tepla při tavném svařování dojde k natavení připravených svarových ploch, k promísení základního kovu s roztaveným přídavným materiálem a dochází k vytvoření nejprve tzv. kořene svaru. Následně se na kořenovou vrstvu postupně kladou další výplňové vrstvy housenek až se vyplní celý průřez svaru svarovým kovem spoje, který je tvořen zejména přídavným materiálem. Přídavný materiál se na svarových plochách smísí se základním materiálem, kdy proniká do něj a vytváří se tzv. závar, charakterizovaný hloubkou závaru (hloubkou svarové lázně). Podle množství tepla vneseného do základních materiálů se vytvoří odpovídající tepelně ovlivněná oblast, kdy její velikost a gradient teploty jsou úměrné teplotnímu pnutí, které následně vede ke vzniku deformací a způsobuje také změnu struktury základního materiálu v blízkosti svaru. Tyto změny nejsou až tak výrazné u ocelí se zaručenou svařitelností, tzn. s obsahem uhlíku do 0,22 %.

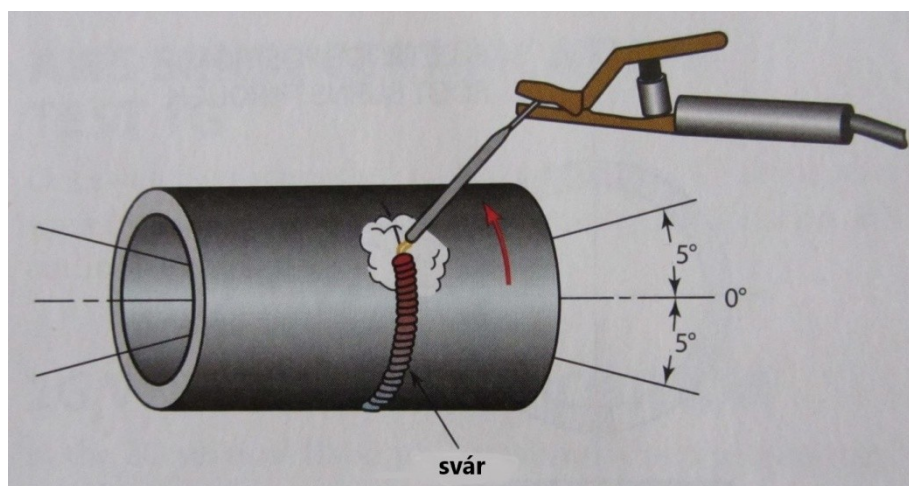
Metalurgické pochody při svařování zahrnují řadu fyzikálních i chemických jevů, které mají zásadní vliv na mechanické a technologické vlastnosti svarového spoje, to znamená schopnost materiálu vytvořit metalurgické spojení požadovaných vlastností. Jednotlivé fáze svařovacího procesu se skládají z ohřívání, vlastního svařování, chladnutí a krystalizace svarového spoje, případně lze po svaření použít postupy pro zlepšení vlastností svarového spoje např. vhodné tepelné zpracování.

I proces svařování podléhá přírodním zákonům a proto je nutné mít odpovídající znalosti z fyziky a chemie, které nám umožňují lépe zvládnout problematiku svařování k získání kvalitních finálních svarových spojů. V průběhu svařování se v rámci časové a teplotní transformace vytváří takové změny termodynamických podmínek, při kterých snadno zanikají staré a vznikají nové strukturní vazby, proto lze také obecně svařování popsat jako proces změny vnitřní struktury základního a přídavného materiálu za účelem získání trvalého nerozebíratelného spojení.

Svařování elektrickým obloukem je nejpoužívanější metoda tavného svařování v současnosti. Zdrojem tepla je elektrický oblouk, který hoří mezi elektrodou a svařovaným materiálem (případně mezi dvěma elektrodami). Vlivem tepla elektrického oblouku dojde k lokálnímu natavení a následnému spojení svařovaných dílů. Tepelný výkon  $Q$  [W] elektrického oblouku vyjadřuje množství tepla, které projde z oblouku do sváru [18-22].

### 3.1.1 Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (metoda 111)

Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (MMA) lze charakterizovat jako metodu svařování elektrickým obloukem s odtavujícími se kovovými elektrodami, které jsou obaleny tavidlem (obr. 3). V závislosti dle použitých elektrod a svařovaného materiálu se pro hoření elektrického oblouku využívá jak stejnosměrný, tak i střídavý elektrický proud. Obal (tavidlo) plní funkci metalurgickou, plynotvornou a ionizační. I když je ruční obloukové svařování nejstarší metodou svařování elektrickým obloukem, je stále díky své univerzálnosti, flexibilitě a možnosti svařování ve všech polohách velmi populární a hojně využívanou, dobře se uplatňuje v terénních podmínkách na stavbách a staveništích [16, 21].

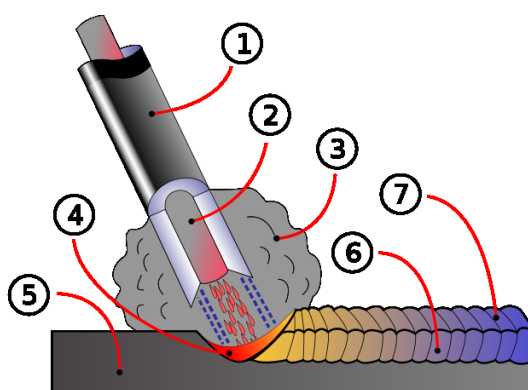


Obr. 3: Svařování potrubí metodou ručního obloukového svařování obalenou elektrodou v poloze PH [22]

#### ***Princip obloukového svařování***

Roztavení základního a přídavného materiálu stejně jako u všech metod obloukového svařování je docíleno hořením elektrického oblouku mezi základním materiálem respektive svarovou lázní a tavíci se kovovou obalenou elektrodou (obr. 4). V průběhu hoření oblouku se elektrody odtavují, kov se ukládá do svarové lázně a po ztuhnutí dochází k vytvoření svarového spoje. Současně se z obalu (tavidla) vytváří během svařovacího procesu struska, která vyplouvá na povrch svarové lázně, kde také následně ztuhne. Strusku je nutné důkladně odstranit, zejména pokud budou následně kladeny další vrstvy svarových housenek, neboť při

nedokonalém odstranění strusky dojde k zalití strusky následujícími vrstvami svarového kovu, čímž dochází k tvorbě nepřípustných vad ve svarovém kovu, tzv. vměstky. Ruční obloukové svařování lze použít ve všech polohách a to v rozsahu elektrického proudu od 10 do 2 000 A, kdy velikost svařovacího elektrického proudu závisí na průměru elektrody, typu obalu i jakosti svařovaného materiálu. Touto metodou lze svařovat nelegované, nízkolegované i vysoce legované oceli a jiné materiály. Protože při rozkladu tavidla je svarová lázeň chráněna plyny, které vznikají při rozkladu tavidla a tudíž není nutná dodatečná plynová ochrana lázně, je tato metoda vhodná při svařování na staveništi i za nepříznivých povětrnostních podmínek, jako např. při montážním svařování plynového potrubí [16, 20, 22, 23].



*Obr. 4: Princip ručního obloukového svařování obalenou elektrodou [16]*

*(1) obal elektrody, (2) kovové jádro elektrody, (3) ochranná atmosféra, (4) svarová lázeň, (5) základní materiál, (6) svarový kov, (7) struska*

### **3.2 Volba základních materiálů**

Pro výstavbu ocelových plynovodů se používají nízkouhlíkové nelegované a nízkolegované (mikrolegované) trubní oceli požadované jakosti v závislosti na provozním tlaku a průměru, ve stavu tepelně zpracovaných, a to normalizačně žíhaných nebo termomechanicky zpracovaných a dle výrobního provedení jako bezešvé a podélně, případně spirálovitě (šroubovicově) svařované.

Pro nízkotlaké a středotlaké plynovody lze použít trubní materiály dle ČSN EN ISO 3183, příloha L s označením L210, L245, L290 pro PSL 1 a L245N, L290N pro PSL 2, případně ekvivalentní dle materiálových ČSN např. jakost materiálu 11 353.1, 11 373.1, 11 378.1, 12021.1, 12022.1 s dodržení požadavků, uvedených již v kapitole 2.7.1.

Pro vysokotlaké plynovody lze použít trubní materiály dle ČSN EN ISO 3183, příloha M s jakostí materiálu s označením L245NE/ME, L290NE/ME, L360NE/ME v souladu s

požadavky, uvedenými již v kapitole 2.7.2. V odůvodněných případech lze použít i trubní materiály o vyšší hodnotě meze kluzu např. L415NE/ME, L485NE/ME [3, 14, 15].

### 3.3 Volba přídavných materiálů

Přídavné materiály musí vyhovovat svým chemickým složením, mechanickými, metalurgickými a operativními vlastnostmi požadavkům na zhotovení kvalitního svarového spoje strojních součástí, dílů nebo konstrukcí. Mechanické vlastnosti přídavného materiálu musí vykazovat stejné nebo vyšší hodnoty než svařované základní materiály. Obalené elektrody se skládají z kovového jádra a tavidla obaleného okolo jádra. Jádrem elektrody je drát nebo tyčovina, tavidlo (obal) je nanášeno na jádro. Chemické složení obalu určuje vlastnosti svarového kovu, musí vyhovovat daným základním materiálům a použitému svařovacímu proudu. Obal plní funkci plynotvornou, ionizační, metalurgickou a ochrannou.

**Plynotvorná funkce** obalu zajišťuje tvorbu ochranné atmosféry z kouře a plynů vznikajících při hoření elektrického oblouku a spalování tavidla. Ochranná atmosféra brání přístupu vzdušného kyslíku a dusíku do svarové lázně a tím zajišťuje požadované plastické vlastnosti svarového kovu.

**Ionizační funkce** poskytuje vlivem rozkladu solí alkalických kovů v obalu lepší zapalování a hoření elektrického oblouku.

**Metalurgická funkce** obalu spočívá v rafinaci (čištění) svarového kovu (od nevhodných prvků S a P) a dodání propalovaných prvků (u oceli např. Mo, Ti, Si, Cr) ve svařovaných materiálech, které musí být dolegovány jádrem elektrody nebo jejím obalem.

**Ochranná funkce** obalu je dána tím, že struska vytvořená z obalu formuje svarový kov a zpomaluje jeho ochlazování a chrání svarový kov jak před vlivem atmosféry, tak i před vznikem zejména horkých trhlin.

Pro obalené elektrody se používají tyto druhy obalů:

A – kyselé, B – bazické, C – organické, R – rutilové, a jejich kombinace RA, RB, RC. Při volbě obalených elektrod je nutné brát v úvahu základní svařovaný materiál (chemické složení, mechanické a technologické vlastnosti, tloušťku materiálu), druh a velikost namáhání svařence (např. tah, tlak, ohyb, statické nebo dynamické namáhání), pracovnímu prostředí, kterému bude svařenec vystaven a polohu při svařování. Zásadní vliv na jakost svaru při ručním svařování má průměr elektrody, svařovací proud, délka oblouku a rychlost svařování.

Průměr jádra elektrody se volí podle tloušťky svařovaného materiálu, tvaru, rozměru a polohy svaru a druhu obalu. Svařovací proud se určuje podle průměru elektrody. Lze použít

následující empirické vzorce určující intenzitu proudu  $I$  [A] v závislosti na průměru jádra elektrody  $d$  [mm]:

$I \approx (40 \text{ až } 55) d$  - pro elektrody s kyselým obalem,

$I \approx (35 \text{ až } 50) d$  - pro elektrody s bazickým obalem.

Vzhledem k použité elektrodě v praktické části práce, jsou blíže popsány vlastnosti pouze bazické elektrody.

**Bazický obal** obsahuje směs cca 45% fluoritu, 40% vápence, oxid křemičitý a dále feromangan, rutil, vodní sklo, feroslitiny a legující prvky. Elektrody s bazickým obalem vyžadují stejnosměrný proud a nepřímé zapojení elektrody, tzn., že elektroda je připojena na (+) pól (výjimku tvoří obaly na bázi zirkonu). Bazické elektrody jsou vhodné pro svařování ve všech polohách. Svarový kov, zhotovený bazickou elektrodou obsahuje nízký obsah difúzního vodíku, což má dobrý vliv na vrubovou houževnatost při snížených teplotách a sníženou náchylnost k trhlinám za tepla i za studena v porovnání s ostatními typy obalů.

Pro praktickou část byla použita ověřená bazická elektroda s označením OK 48.05 dle EN ISO 2560-A (E 42 4 B 42 H5), která splňuje svou deklarovanou mezí kluzu a pevnosti požadované hodnoty pro jakost trubek L245(N,M) dle ČSN EN 12732. Jedná se o bazickou elektrodu s nízko-návlhavým obalem a nízkým obsahem difúzního vodíku pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Elektroda poskytuje vyšší rychlost a tím i výkon svařování především v poloze zdola nahoru a velmi dobré operativní vlastnosti i při velmi nízkých proudech, což je výhodné zejména při svařování tenkostěnných potrubí [16, 19, 20, 21, 24, 25].

### 3.4 Popis vzniku svarového spoje při tavném svařování

**Svarový kov** je částí svarového spoje u všech tavných metod svařování a vzniká tavením základního a přídavného materiálu vlivem působení tepelného zdroje při zahřátí nad teplotu likvidu. Výsledný podíl přetaveného základního materiálu ve svarovém kovu nazýváme promísení. Vlastnosti svarových kovů, pokud je to možné, se požadují shodné se základním materiálem. Stupeň promísení při ručním obloukovém svařování činí od 10 do 40%. Promísení je při svařování kořenové části vyšší než při svařování výplňové části. Výsledné vlastnosti svarového kovu jsou dány souborem materiálových, metalurgických a technologických faktorů a to ve třech stádiích tvorby svarového kovu. Lze je označit jako stádium tavení a metalurgických reakcí, stádium tuhnutí a stádium strukturních transformací, proto jsou také do značné míry výsledné vlastnosti svarového kovu dány průběhem

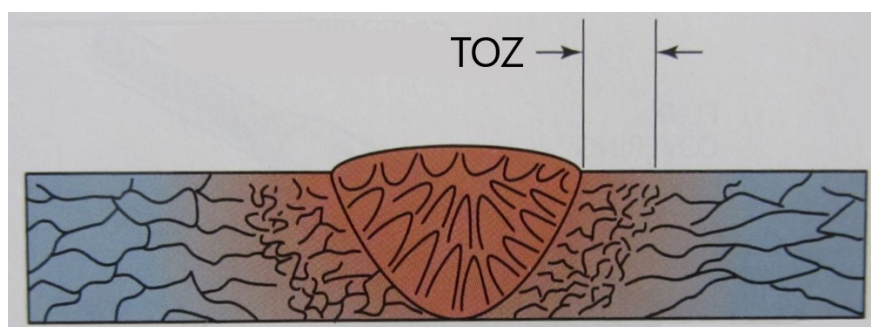
metalurgických reakcí mezi svarovým kovem a struskou, která vzniká roztavením obalů elektrod.

**Krystalizace svarového kovu** začíná při poklesu teploty pod teplotu likvidu. Při tuhnutí kovové taveniny dochází k růstu krystalizačních zárodků, které již dosáhly kritické velikosti a vznikají krystality tvarů globulárních, plochých a stéblovitých krystalů. Podle způsobu růstu jsou označovány jako rovinné nebo celulární krystaly a dendrity. Svarový kov krystalizuje přednostně vlivem heterogenní nukleace na svarových plochách. Charakter růstu krystalů je epitaxiální, to znamená, že krystalizující svarový kov dědí orientaci zrn přechodové oblasti (TOZ). Jestliže v přechodové oblasti dojde ke zhrubnutí zrn, tak i primární dendrity svarového kovu jsou hrubé. Způsob krystalizace svarového kovu ovlivňuje druh svařovaného materiálu, tvar svarové lázně, objem roztaveného kovu, technologie a parametry svařování [6, 7, 22].

### 3.4.1 Tepelně ovlivněná zóna

U svarů provedených tavnými metodami svařování je kromě svarového kovu odlišná od základního materiálu i jeho struktura v nejbližším okolí svaru, které se nazývá tepelně ovlivněnou oblastí (TOO) nebo zónou (TOZ) a bývá nejslabším místem dobře provedeného svarového spoje z hlediska mechanických vlastností. Její velikost a změna struktury resp. mikrostruktury je ovlivněna převážně množstvím vneseného tepla a např. u feritických ocelí i rychlostí ochlazování a rychlostí polymorfních přeměn struktury. Při ohřátí kovů se obecně očekává růst zrna a rychlost růstu se zvyšuje s teplotou a délkou času při této teplotě. Čím déle je kov vystaven teplotě nad  $A_{c3}$ , tím větší bude velikost zrna.

Tepelně ovlivněnou zónou (TOZ) je označována oblast svarového spoje, ve které došlo ke změnám mikrostruktury v důsledku působení zdroje tepla při svařování (obr. 5). Ze základního materiálu, který bezprostředně přiléhá ke svarovému kovu se vytváří tepelně ovlivněná oblast, ve které teplota exponenciálně klesá až na teplotu neovlivněného základního materiálu.



Obr. 5: Znáznornění tepelně ovlivněné zóny (TOZ) [22]

V kovech a slitinách s polymorfní přeměnou jako u ocelí dochází při svařování v TOZ k významným změnám mikrostruktury, které mají velký vliv na vlastnosti svarových spojů. Tyto přeměny jsou závislé především na chemickém složení, původní mikrostruktuře a teplotních cyklech, kterými byla TOZ ovlivněna (rychlost ohřevu a rychlost ochlazování) a částečně i na velikosti svařence, kdy větší svarky jsou schopny absorbovat lépe teplo bez výrazného zvýšení teploty. Šířka tepelně ovlivněné oblasti je závislá zejména na použité technologii a intenzitě tepla přivedeného do svaru. U metody svařování obalenou elektrodou může dosahovat pásmo TOZ až 9 mm od kořene svaru.

Tepelně ovlivněnou zónu svarového spoje u ocelí lze rozdělit na charakteristické jednotlivé oblasti (obr. 6):

**Oblast částečného natavení** tvoří přechod z TOZ do svarového kovu, tato oblast se redukuje na linii označenou hranice ztavení, případně na plochu, protože rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu je minimální.

**Oblast přehřátí**, což je oblast s teplotami nad  $A_{c3}$ , která překračuje teplotu intenzivního růstu primárních zrn, tak zvanou teplotu přehřátí. Pro nelegované oceli je teplota přehřátí kolem  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pro mikrolegované oceli je teplota asi  $1250$  až  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  a pro nízkolegované oceli asi  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V přehřáté oblasti může docházet k výraznému poklesu plastických vlastností, jelikož v případě velkých rychlostí ochlazování a dostatečném množství uhlíku zde může vzniknout martenzitická struktura.

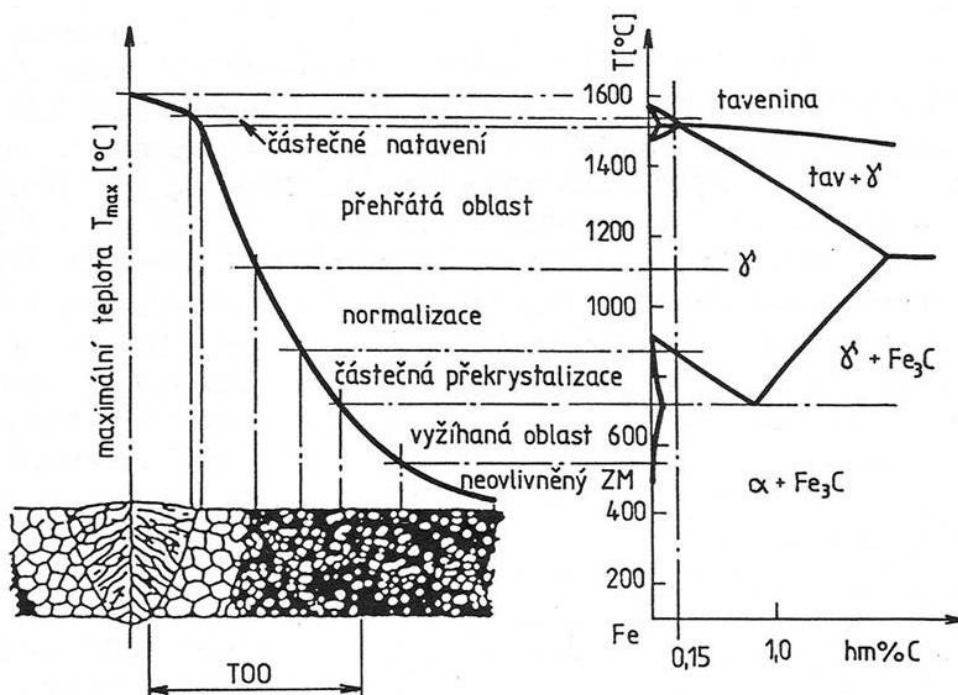
**Oblast normalizace** (jemnozrnná oblast) je oblast zahřátá těsně nad teplotu  $A_{c3}$ , podobně jako u normalizačního žihání. Tato oblast prošla úplnou polymorfní přeměnou  $\text{Fe}\alpha\text{-Fe}\gamma\text{-Fe}\alpha$ . V této oblasti podobně jako u normalizačního žihání je zrna stejnoměrná a jeho velikost se zvětšuje se stoupající dosaženou teplotou.

**Oblast částečné překrystalizace** s neúplnou polymorfní přeměnou, u které došlo k neúplné transformaci perlitu a feritu. Tato oblast leží mezi teplotou  $A_{c3}$  a  $A_{c1}$  a obsahuje jak lokality, u nichž k této transformaci došlo, tak i oblasti, kde zůstala původní struktura.

**Oblast zahřátá pod teplotu  $A_{c1}$** , kdy nedochází k fázové přeměně struktury, ale k lokálnímu přehřátí oproti chladnějšímu základnímu materiálu a probíhají změny pouze v rámci tuhého roztoku  $\alpha$  nebo v substruktuře. V důsledku vyššího koeficientu difúze při dané teplotě může docházet k hrubnutí precipitátů a také probíhají rekrytalizační pochody (cca do  $500^{\circ}\text{C}$ ).

V důsledku uvedeného odlišného stupně austenitizace a různých rychlostí ochlazování se vyskytuje ve svarovém spoji různá struktura a tudíž i rozdílné mechanické vlastnosti. Při chladnutí probíhá krystalizace a příslušné strukturní změny v oblasti svarového spoje podle diagramu  $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$  (obr. 6).





Obr. 6: Tepelně ovlivněná oblast svarového spoje a její vztah k diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C [16]

Účinky tepelně deformačního cyklu svařování vyvolávají v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje pokles pevnosti těsně nad teplotou  $A_{c1}$ . Vhodným doporučením je limitovat použitý tepelný příkon svařování, aby šířka popuštěné oblasti byla co nejmenší [6, 7, 16, 20, 22, 26].

### 3.4.2 Napětí a deformace při svařování

Napětí a deformace v materiálech vznikají v průběhu jejich ohřevu a ochlazování v důsledku dilatačních změn a metalurgických procesů, proto napětí ve svařovaných dílech a jejich deformace jsou zákonitým doprovodným jevem a nelze jim zabránit. Lze je ale částečně omezit vhodně zvolenými technologickými postupy svařování a optimalizací konstrukčního řešení svařence. Vznikající napětí ve svařovaných konstrukcích jsou tzv. vnitřní, také někdy označována jako zbytková napětí.

Pro vznik a velikost napětí a deformací z hlediska fyzikální a metalurgické podstaty jsou při svařování určující:

- Množství tepla vneseného do svaru
- Nerovnoměrný ohřev a ochlazování základního materiálu (nestacionární charakter teplotního pole)
- Tepelně–fyzikální vlastnosti (teplotní roztažnost a tepelná vodivost) a jejich rozdílnost u základního a přídavného materiálu

- Mechanické vlastnosti základního materiálu (především mez kluzu v tahu a tlaku)
- Změny struktury spojené s objemovými změnami v případě, že v materiálu probíhají fázové přeměny
- Konstrukční řešení a vlastní tuhost svařence [22, 27].

### 3.4.3 Druhy napětí při svařování

Základní rozdělení vnitřních napětí z hlediska příčiny a způsobu jejich vzniku se dělí na napětí teplotní a strukturní. **Teplotní napětí** vznikají vlivem nerovnoměrného ohřevu a ochlazování materiálu. **Strukturní napětí** jsou způsobena fázovými transformacemi v důsledku vzniku různých struktur, kdy mohou vznikat různé produkty fázových přeměn s rozdílnými objemy.

Výše uvedené oba typy napětí, které se vyskytují v materiálu, mohou být buď dočasné, nebo zbytkové (trvalé). **Napětí dočasná** v materiálu působí pouze po určitou dobu, po kterou existuje příčina jejich vzniku. **Napětí zbytková** zůstávají v materiálu i po ukončení technologické operace nebo procesu, které je vyvolaly.

Podle velikosti (objemu), ve kterém napětí působí se rozděluje na makroskopická, mikroskopická a submikroskopická. **Makroskopická** vznikají a vyrovnávají se v makroskopických objemech materiálu, ve vztahu ke geometrii tělesa mají určitý směr a velikost (napětí I. druhu). **Mikroskopická** vznikají a vyrovnávají se v mikroskopických objemech tělesa, které odpovídají oblastem velikosti zrn. Jejich smysl a směr nemá vztah k dané geometrii tělesa (napětí II. druhu). **Submikroskopická** vznikají a vyrovnávají se v submikroskopických objemech tělesa, které odpovídají velikosti krystalové mřížky, nebo v oblasti několika elementárních buněk a z hlediska vnějších deformací se neprojevují a nemají praktický význam (napětí III. druhu).

Z pohledu svařování podle směru působení vzhledem k ose svaru se napětí rozděluje na podélná, příčná a ve směru tloušťky. **Podélná napětí** působí ve směru osy svaru, tudíž ve směru svařování. **Příčná napětí** působí ve směru kolmém na osu svaru a na směr svařování. **Napětí ve směru tloušťky** se projevuje především při svařování tlustostěnných součástí [6, 7, 27].

### 3.5 Vady svarových spojů při tavném svařování

Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými předpisy nebo technickými podmínkami. Vadu ve svarovém spoji lze označit za určitou nespojitost ve svaru nebo odchylku od požadované geometrie svarového spoje. Vady ve svarech se považují za nebezpečné koncentrátoři napětí, které se mohou stát iniciátory

křehkého lomu a zejména negativně mohou ovlivnit hodnotu meze únavy svařované konstrukce. Vada ve svaru nemusí být nutně umístěna jen ve svarovém kovu, ale může vzniknout v důsledku teplotního nebo jiného vlivu svařování i v tepelně ovlivněné zóně nebo v základním materiálu.

Vady se označují za přípustné, nepřípustné, opravitelné nebo neopravitelné. Vady přípustné jsou označovány vady, které normy nebo technické podmínky ještě dovolují a jejich odstranění není nutné. Vady nepřípustné jsou ale takové, které neodpovídají povoleným (přípustným) hodnotám. Tyto vady mohou být opravitelné nebo neopravitelné. Do provozu lze připustit svary bez zjištěných vad, nebo pouze s takovými vadami, které neohrozí při provozním zatížení bezpečnost a spolehlivost svařovaných konstrukcí.

Podle jejich polohy lze rozdělit vady na povrchové a vnitřní. **Povrchové vady** se mohou na povrchu vytvořit jako trhliny, mikrotrhliny, studené spoje, neprůvary a neprovařené kořeny. **Vnitřní vady** představují nejčastěji plynové dutiny, vměstky, staženiny, neprůvary v kořeni u oboustranného nebo koutového svaru, studené spoje mezi vrstvami housenek, nebo také studené spoje mezi základním materiálem a svarovým kovem.

Podle tvaru lze vady ve svarovém spoji rozdělit na bodové, plošné a prostorové. **Bodové** se tvoří jako mikropóry, nebo např. malé sférické vměstky, **plošné** vytváří trhliny, mikrotrhliny, studené spoje, neprůvary a nespojitosti návaru se základním materiálem a **prostorové** představují plynové dutiny (bubliny, póry), vměstky (struskové, oxidické, kovové) a staženiny (mezidendritické, kráterové).

Výčet jednotlivých typů vad ve svarových spojích je uveden v ČSN EN ISO 6520-1 (část 1) pro tavné svařování a podle charakteru se definují a základního číselného kódu označují následovně:

1. **trhliny** (podélné, příčné, kráterové, nespojité, rozvětvené, aj.),
2. **dutiny** (póry, bubliny, staženiny), vyskytují se jako jednotlivé nebo ve shlucích a řádcích,
3. **pevné vměstky** (struskové, tavidlové, oxidické, kovové),
4. **studené spoje** (chybí kovová vazba mezi svarovým kovem a základním materiálem, materiál nebyl nataven a metalurgicky spojen),
5. **vady tvaru a rozměru** (zápaly, vruby v kořeni i na povrchu, vruby mezi jednotlivými housenkami, nadměrné převýšení svaru, přetečení krycí nebo kořenové vrstvy, lineární přesazení, neúplné vyplnění svaru, nepravidelná šířka, vadné napojení svaru, aj.),
6. **ostatní vady** (stopa po hoření oblouku, rozstřík, vytržený povrch, vada stehu, brusné stopy, aj.) [16, 27].

### 3.5.1 Výskyt vad u obloukového svařování

V následujícím textu jsou blíže popsány vady, které se často vyskytují u obloukového svařování.

**Trhliny** jsou nejvíce nebezpečné vady a proto jsou vždy nepřipustné. Vyskytují se ve svaru nebo přechodové oblasti (TOO). Podle teploty jejich vzniku se dělí na horké a studené.

**Horké trhliny** nejčastěji vznikají při teplotách 1000 až 1300 °C, jejich průběh sleduje hranice zrn, proto se označují jako interkrystalické. Vznik je vyvolán vysokým vnitřním pnutím při malé soudržnosti hranic zrn a vznikají bezprostředně po svařování na rozdíl od zpožděné povahy prasklin indukovaných vodíkem. Příčinou vzniku může být také výskyt vyššího obsahu síry v oceli, kdy se na hranicích zrn vytváří sulfid železa s nízkým bodem tání.

**Studené trhliny**, vzniklé při nízkých teplotách okolo 300 °C a nižších, procházejí přes zrna a proto se označují jako transkrystalické. Tyto trhliny vznikají vytvořením tvrdých a křehkých struktur při rozpadu austenitu, což je doprovázeno pnutím.

Významnou příčinou vzniku studených trhlin může být i přítomnost difuzního vodíku ve svaru, který při rychlém ochlazení zůstane zablokován v pórech svarového kovu a při následné rekombinaci atomárního vodíku na molekulární, respektive zvětšením jeho objemu může být příčinou trhlin. Při ochlazení svarového kovu atomy vodíku již nejsou rozpustné a jsou vytlačovány na hranice zrn. Jednotlivé nestabilní atomy vodíku se časem začnou pohybovat mezi hranicemi zrn a může dojít ke spojení s jiným atomem vodíku za vzniku stabilního molekulárního vodíku. Doba, kdy se mohou tyto trhliny rozvíjet, může trvat hodiny nebo dokonce dny.

**Póry a bubliny** jsou prostorové vady kulovitého nebo protáhlého tvaru vyplněné plynem. Vznikají v důsledku vylučování plynů, které jsou obsaženy ve svarové lázni při jejím chladnutí. Při rychlém chladnutí krystalizující kov klade odpor unikajícím plynům, které zůstávají uvězněny ve svarovém kovu v podobě bublin a pórů. Plyny mohou vznikat vlivem nedostatečné ochrany tavné lázně před okolní atmosférou, z důvodu vlhkosti přídavného materiálu, případně nečistot na svarových plochách apod.

**Vměstky** se mohou vyskytovat struskové, které vznikají při svařování obalenou elektrodou a při nedokonalém odstranění strusky mezi jednotlivými svařovanými vrstvami. Oxidické vměstky vznikají zejména v důsledku nedokonalého očištění povrchu před svařováním. Kovové vměstky (např. wolframové) se svým vznikem týkají především metody (TIG) svařování netavicí se wolframovou elektrodou při jejím dotyku s tavnou lázní nebo základním materiálem.

**Studené spoje** jsou velice nebezpečné vady se silným vrubovým účinkem. Jsou způsobeny nedokonalým tavným spojením svarového kovu se základním materiálem nebo předchozí housenkou, čímž vznikají místa ve svaru, která nejsou metalurgicky spojené.

**Neprovařený kořen** vzniká v případě, kdy svarové plochy v kořeni svaru nejsou nataveny a spojeny se svarovým kovem. Tato vada významně oslabuje nosný průřez svarů.

**Zápaly a vruby** jsou ostrá natavená prohloubení na hranicích svarové housenky a základního materiálu. Zmenšují průřez základního materiálu a vzhledem k vrubovému účinku se jedná o velice nebezpečnou vadu u dynamicky namáhaných konstrukcí. Vrub je místem koncentrace napětí a může být počátkem vzniku trhliny.

**Krápníky** vznikají při svařování kořene vlivem vysokého proudu, kdy dochází k nepřiměřenému průvaru v kořeni svaru a důsledkem je protečení roztaveného kovu pod úroveň svařovaných součástí. Krápníky neovlivňují mechanické vlastnosti svaru, ale např. u potrubí zmenšují jeho vnitřní světlost.

**Přesazený kořen** vzniká nesprávným slícováním svarových ploch, případně při svařování základního materiálu různé tloušťky bez provedených opatření pro vyrovnání rozdílné tloušťky. V konečném důsledku tato vada může působit podobně jako vrub [22, 27, 28].

### 3.5.2 Výskyt vad u obvodových montážních svarů

Obvodové svary trubek při montážním svařování na stavbách jsou často prováděny ve ztížených podmínkách, které mohou být příčinou horší kvality těchto svarových spojů s výskytem vad a nedokonalostí v porovnání s továrně zhotovenými svary. To bylo patrné ještě v nedávné době, kdy byl požadovaný rozsah defektoskopické kontroly na zjišťování vnitřních vad u VTL rozvodů procentuálně omezen pouze na určitou část těchto svarů. Teprve poslední novelou předmětné normy ČSN EN 12732 z roku 2014 je požadována defektoskopická kontrola montážních svarů v rozsahu 100 %, která zajišťuje vyšší jakost u všech svarů a tím vyšší celkovou bezpečnost a spolehlivost plynovodů, ale současně také vyšší nároky na dovednost a zručnost svářečů. Z předešlé praxe lze předpokládat, že se dodnes provozují plynovody s montážními svary, které vykazují vnitřní vady, které nemusely být odhaleny vzhledem k požadovaným procentuálním kontrolám. Pokud neuvažujeme další přídatné napětí, vyvolané účinky nesprávného uložení potrubí, je úroveň namáhání obvodových svarů maximálně poloviční v porovnání s podélnou rovinou trubky. Z toho vyplývá menší nebezpečnost běžných vad montážních svarových spojů jako převýšení tupého svaru, strmý přechod svaru do základního materiálu nebo nedokonalá kresba svarů. Ale i u montážních

svarů nelze připustit vady typu trhliny, neprůvary s vyšším vrubovým účinkem, studené spoje, hrubé póry a dutiny z naplynění nebo hlubší zápaly s vyšším vrubovým účinkem, které u vysokotlakých plynovodů musí splňovat stupeň jakosti „B“ nebo „C“ dle ČSN EN ISO 5817, kde jsou ve většině kvalifikovány jako nepřípustné, případně limitovány maximálním rozměrem [3, 25].

### 3.6 Svařitelnost uhlíkových ocelí

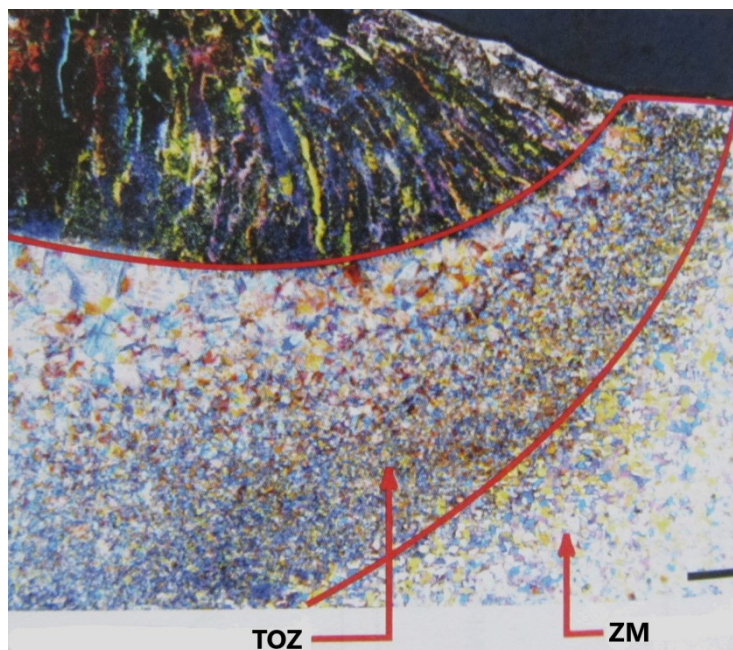
Dle původních materiálových ČSN byly uhlíkové oceli zařazeny do tříd 10, 11, 12, kdy pro potrubní aplikace v plynárenství se využívaly vybrané oceli tř. 11 a 12. Podle evropské normy ČSN EN 10027-1 náleží do skupiny 1 a označují se podle způsobu použití a mechanických vlastností symboly *S*, *P*, *L*, *E* atd., kdy pro potrubní aplikace jsou označeny písmenem *L*. Svařitelnost uhlíkových ocelí ovlivňuje zejména jejich chemické složení a největší význam pro svařitelnost určuje uhlík. S jeho rostoucím obsahem se zvyšuje náchylnost k zakalení při svařování a zvyšuje se současně náchylnost ke vzniku studených trhlin, přednostně v tepelně ovlivněné zóně (TOZ). U nelegovaných ocelí se musí brát v úvahu, že uhlík způsobuje v TOZ zvýšení tvrdosti a současně snižuje plasticitu, což vede ke vzniku vnitřního pnutí s možností vzniku trhlin. Svařitelnost ovlivňují samozřejmě další legující prvky a nečistoty jako např. křemík, mangan, síra, fosfor, dusík, vodík, hliník, měď. U potrubních rozvodů plynu se kromě obsahu uhlíku sleduje zejména obsah síry a fosforu, jako nežádoucích prvků nad jejich požadované limitní obsahy [6, 7, 22].

#### 3.6.1 Svařitelnost jemnozrnných ocelí

Jelikož chemické složení jemnozrnných mikrolegovaných ocelí je podobné nelegovaným konstrukčním uhlíkovým ocelím, lze konstatovat, že platí obdobné obecné zásady svařitelnosti s následujícími odlišnostmi.

Při svařování jemnozrnných mikrolegujících ocelí lze očekávat růst zrn v tepelně ovlivněné zóně svarů (TOZ), což v důsledku znamená pokles plastických vlastností v tomto tepelně ovlivněném pásmu. Doporučuje se svařovat, pokud lze, bez přehřevu a s omezeným tepelným příkonem při svařování. Pokud je nutno použít přehřev, je obvykle dostačující teplota v rozsahu 100 až 150°C. Po svaření lze tuhé svarové spoje žíhat na snížení vnitřních pnutí s nižším rozmezím žíhacích teplot 560 až 600 °C pro dosažení optimálního poměru pevnostních a plastických vlastností, ale tepelné zpracování se obecně u svarů potrubních rozvodů plynu nepoužívá.

Na ilustrativním obrázku (obr. 7) při dostatečném zvětšení lze v červeně ohraničené tepelně ovlivněné zóně pozorovat růst zrna vlivem vysokých teplot, tak i tvorbu jemného zrna v důsledku alotropické transformace [6, 7, 22].



Obr. 7: Tepelně ovlivněná zóna (TOZ) svarového spoje a vliv na velikost zrna [22]

### 3.6.2 Svařitelnost termomechanicky zpracovaných ocelí

Termomechanicky zpracované oceli je nekonvenční způsob výroby polotovarů, ale jejich svařitelnost je podobná s konvenčně tepelně zpracovanými oceli stejného chemického složení, ale s následujícími odlišnostmi.

Při svařování vlivem teplotního cyklu se vyruší účinek termomechanického zpracování v tepelně ovlivněné zóně (TOZ) svarů. Důsledkem je pokles meze pevnosti, meze kluzu a tvrdosti v oblasti částečné překrystalizace TOZ, který je charakterizován teplotami  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ , kdy snížení je zřejmé především v oblasti kolem  $A_{c1}$ . Současně dochází ke snížení vrubové houževnatosti v oblasti přehřátí TOZ, omezené teplotou solidu a přehřátí svařované oceli. V důsledku těchto změn svarový spoj vykazuje nižší mez pevnosti než základní termomechanicky zpracovaný materiál. Proto, aby snížení pevnosti bylo co nejmenší, je nutné limitovat při svařování tupých svarů tepelný příkon  $q/v$ , tudíž množství tepla vneseného do svaru na jednotku jeho délky. Čím bude tato hodnota menší, tím dosáhneme užší pásma tepelně ovlivněné zóny (TOZ) svaru a tudíž bude menší i snížení meze pevnosti tupého svarového spoje oproti základnímu materiálu. Doporučuje se svařovat přídavnými materiály s menšími průměry elektrod, nejmenším průvarem, menšími proudy a větší postupovou



rychlostí s nižším tepelným příkonem do 10 kJ/cm, přednostně používat přídavné materiály s minimálním obsahem difuzního vodíku.

Tepelné zpracování se obvykle u svarů termomechanických ocelí neprovádí, tak jako se obecně nepoužívá u svarů potrubních rozvodů plynu [6, 7, 29].

### **3.7 Požadavky provozovatele na proces svařování ocelových plynovodů**

Základní požadavky kladené na svařované ocelové potrubí plynárenských zařízení jsou uvedeny v předpisu ČSN EN 12732, z něhož vychází i požadavky metodického pokynu provozovatele plynovodů v ČR, určeného pro zhotovitele plynovodů.

Pro veškeré svářečské práce na svařovaných konstrukcích v plynárenství musí mít každý zhotovitel vystavené vlastní protokoly o schválení postupu svařování (WPQR) podle ČSN EN ISO 15614-1, které vydala nezávislá dozorcí organizace a to v rozsahu prováděných svářečských prací na plynárenských zařízeních. Protokoly o schválení postupu svařování (WPQR) slouží následně jako podklad k vyhotovení konkrétních postupů svařování, tzv. specifikací postupů svařování (WPS). Specifikace postupů svařování (WPS) jsou zpracovány pro obloukové svařování metodou 111 dle ČSN EN ISO 15609-1. WPS vyhotovuje výhradně svářečský dozor zhotovitele a schvaluje inspekční svářečský dozor provozovatele.

Požadavky na trubní (základní) materiál jsou již uvedeny v kapitole 2.7.1 pro NTL, STL plynovody a v kapitole 2.7.2 pro VTL plynovody.

Z hlediska přídavných materiálů pro vybranou metodu svařování (111), musí obalené elektrody podle ČSN EN ISO 2560-A splňovat požadavky ČSN EN 12732.

Při svařování na potrubí pod přetlakem plynu nebo při svařování VTL plynovodů jsou používány výhradně elektrody s nízkým obsahem difuzního vodíku (H5), přednostně ve vakuovém balení (VacPack). Pro stavbu plynovodů a přípojek je používán výhradně přídavný svařovací materiál doložený inspekčním certifikátem 3.1 dle ČSN EN 10204.

Při svařování trubek spirálově svařených je nutné provést jejich natočení tak, aby vzdálenost svarů mezi dvěma vzájemně svařovanými trubkami byla min. 100 mm. U podélně svařovaných trubek je nutné dodržet, aby podélné svary byly umístěny střídavě v horní části potrubí v poloze od 9. do 3. hodiny.

Při svářečských pracích při teplotě okolí  $T \leq +5$  °C je nutno provést předehřev svařovaných dílů. Předehřev se provádí ve vzdálenosti min. 50 mm na každou stranu od svaru a musí být zajištěn po celou dobu zhotovování svarového spoje. Teplota předehřevu je požadována i pro stehování potrubí.

Tabulka č. 1: Doba a teplota předehřevu [30]

Skupina materiálu dle CEN ISO/TR 15608	Teplota okolí (°C)	Teplota předehřevu (°C) pro tloušťku stěny základního materiálu		Minimální doba předehřevu (min.) pro tloušťku stěny základního materiálu	
		do 8 mm	od 8 do 12 mm	do 8 mm	od 8 do 12 mm
<b>1.1</b>	od +5 do -10	50 - 70	50 - 70	20	20
	pod -10 do -20	50 - 70	50 - 70	20	70
<b>1.2</b>	od +5 do -10	50 - 70	50 - 70	20	20
	pod -10 do -20	50 - 70	50 - 70	70	70
<b>1.3</b>	od +5 do -5	50 - 70	50 - 70	20	70
	pod -5 do -20	50 - 70	50 - 70	70	70

Pro předehřev se na stavbách používají hořáky na propan-butan nebo zemní plyn a pro kontrolu teploty lze použít dotykový, bezdotykový teploměr nebo termokřídly.

Při teplotě  $T \leq 0$  °C musí být zajištěno pozvolné chladnutí svarů přibližně 300 °C/hod, které se zabezpečuje ochrannými zábaly nebo rouškami. Při teplotě  $T < -10$  °C je nutno použít elektricky regulované rohože [30, 31, 32].

### 3.8 Požadavky provozovatele na rozsah zkoušek a jakost svarových spojů

U potrubních rozvodů plynu je kvalita svarového spoje základním předpokladem bezpečnosti a spolehlivosti daného rozvodného zařízení a to po celou dobu předpokládané životnosti. Základní rozdělení plynovodů z hlediska tzv. kategorie požadované kvality udává norma ČSN EN 12732 a je vymezená v kategoriích B, C a D (pozn.: nejedná se o stupně jakosti svarů dle ČSN EN ISO 5817, které jsou také označeny písmeny B, C, D).

Kategorie B je určena pro plynovody s provozním přetlakem do 5 bar včetně, se smluvní mezí kluzu do 360 MPa včetně a pro skupinu materiálů 1.1, 1.2, 1.4 dle CEN ISO/TR 15608. U nás tato kategorie pokrývá NTL, STL plynovody.

Kategorie C je určena pro plynovody s provozním přetlakem nad 5 bar do 16 bar včetně, se smluvní mezí kluzu do 360 MPa včetně a pro skupinu materiálů 1.1, 1.2, 1.4 dle CEN ISO/TR 15608. V České republice vzhledem k používaným rozsahům tlaků se tato kategorie nevyužívá.

Kategorie D je určena pro plynovody s provozním přetlakem nad 16 bar a pro skupinu materiálů 1, 2, 3 dle CEN ISO/TR 15608, tudíž jsou zde kladeny nejvyšší požadavky na kvalitu zhotovených svarů. V České republice je právě kategorie kvality D požadována pro výstavbu veškerých vysokotlakých plynovodů.

Obecně se zkoušky svarových spojů člení na zkoušky nedestruktivní a zkoušky destruktivní a jejich rozsah v plynárenství je dán normou ČSN EN 12732, z které vzhledem k funkci rozvodných zařízení a rozsahu zkoušek vyplývá, že stěžejní v plynárenství jsou zkoušky nedestruktivní, neboť každá destruktivní zkouška vyžaduje odběr vzorku, respektive vyříznutí svaru, který následně vyžaduje nahrazení dvěma svary vložením trubního mezikusu.

Základní zkouškou nedestruktivního zkoušení je vizuální kontrola svarů, dále se dle požadavku ČSN EN 12732 provádí zkoušky kapilární, magnetická prášková, zkoušky prozářením a ultrazvukem.

Rozsah destruktivních zkoušek u odebraného svaru odpovídá rozsahu schváleného svařovacího postupu (WPQR) dle normy ČSN EN ISO 15614-1, která požaduje zkoušky tahem (příčné), vrubové houževnatosti (při rozsahu WPQR do svařované tloušťky 12 mm se nevyžaduje), v ohybu (příčné), tvrdosti, a makrostruktury. Výrobkovou normou mohou být požadovány doplňující zkoušky jako např. zkouška podélná tahem, ohybem čistého svarového kovu, mikrostruktury, korozní, chemický rozbor.

Kromě nedestruktivních, případně destruktivních zkoušek svarů se samozřejmě po dokončení montážních a svařčských prací a před uvedením do provozu vždy ověřuje mechanická pevnost a těsnost celého svařeného úseku potrubí tlakovou zkouškou, respektive zkouškou pevnosti a těsnosti potrubí dle příslušného technického předpisu, kde jsou uvedeny podmínky zkoušení jako např. zkušební přetlak, doba zkoušení, zkušební medium apod. V případě současného provedení stresstestu u VTL plynovodů, lze říci, že do určité míry zkouška stresstem zohledňuje destruktivní zkoušky [25, 27, 30, 32, 33].

### **3.8.1 Nedestruktivní zkoušení svarů**

Nedestruktivní zkoušení (NDT) patří mezi zásadní operace kontroly svařeného úseku ocelového plynovodu a jejich rozsah je určen pro jednotlivé skupiny plynovodů dle provozní tlakové úrovně normou ČSN EN 12732. Pro zjišťování povrchových vad se provádí vizuální kontrola svarů (VT), zkouška penetrační (PT), případně magnetická prášková (MT), kterou lze detekovat i vady nalézající se těsně pod povrchem. Pro zjišťování vnitřních vad se používá zkouška prozářením (RT) do tloušťky 8 mm a zkouška ultrazvukem (UT) při tloušťce nad 8 mm. Rozsah požadovaných zkoušek svarů NDT na ocelových plynovodních potrubích je uveden v následující tabulce [25, 30].

Tabulka č. 2: Rozsah požadovaných zkoušek NDT dle ČSN EN 12732 [25]

Druh plynovodu	Druh svaru	Vizuální kontrola VT	Zkouška RT	Zkouška PT / MT	Zkouška UT
<b>NTL a STL svary</b>	Obvodové svary a koutové svary	Reprezentativní namátková kontrola svarů každého svářeče – min. 1 svar za 1/2 roku	0%	0%	0%
<b>NTL a STL svary</b>	Podélné svary	100%	0%	0%	0%
<b>NTL a STL svary nepodrobené tlakové zkoušce - garanční</b>	Potrubní mosty, volně kladené mostní potrubí, křížení úseku potrubí se železnicí, vodní toky splavnými pro lodě s přístavními moly nebo rampami	100%	100%	100%**	0%*
<b>VTL svary podrobené tlakové zkoušce</b>	Obvodové svary a podélné svary	100%	100%	0%	0%
<b>VTL svary podrobené tlakové zkoušce</b>	Koutové svary	100%	0%	100%	0%
<b>VTL svary nepodrobené tlakové zkoušce – garanční</b>	Obvodové svary a podélné svary	100%	100%	100%**	0%*
<b>VTL svary nepodrobené tlakové zkoušce – garanční</b>	Koutové svary	100%	0%	100%	0%

Vysvětlivky: \* u tloušťky stěny potrubí nad 8,00 mm se požaduje 100%

\*\* u tlouštěk stěny potrubí do 8,00 mm

### 3.8.2 Destruktivní zkoušení svarů u VTL plynovodů

Rozsah destruktivních zkoušek svarů u VTL plynovodů na stavbách je dán příslušnou normou ČSN EN 12732 a vzhledem k požadovanému rozsahu NDT není významný. Konkrétní svar určený k destruktivní zkoušce je vybrán inspekčním svářečským dozorem provozovatele v průběhu stavby a po odběru svaru jsou destruktivní zkoušky u svaru prováděny v souladu s normou ČSN EN ISO 15614-1 a ČSN EN 12732. Nejmenší počet zkoušených svarů v závislosti na délce plynovodu je uveden v následující tabulce [25, 30].

Tabulka č. 3: Rozsah destruktivních zkoušek [25]

Délka plynovodu L [km]	Počet vzorků
$1 < L \leq 10$	1
$10 < L \leq 50$	2
$L > 50$	2 plus 1 další vzorek na každých dalších započatých 50 km

### 3.8.3 Požadavky na jakost provedených svarů

U plynovodů se požadovaná jakost svarů provedených na stavbách zajišťuje primárně pomocí nedestruktivních metod (NDT) dle příslušných prováděcích předpisů, tudíž jsou její výsledky považovány za mimořádně důležité pro bezpečný provoz plynovodů. V dalším textu jsou tak blíže popsány základní principy používaných metod NDT v plynárenství a jejich normativně předpisové rámce k provádění a hodnocení jednotlivých zkoušek.

U nedestruktivního zkoušení je posouzení přípustnosti vad ve svarovém spoji rozhodující pro jeho zásadní funkci ve svařovaném úseku potrubí a to z hlediska jeho užívání po celou dobu předpokládané životnosti rozvodného zařízení. V současnosti zavedený způsob hodnocení přípustnosti vad je založen na stanovení mezních rozměrů vad zjištěných metodami nedestruktivního zkoušení a zařazených do klasifikačních stupňů jakosti (přípustnosti) podle příslušných norem ČSN (EN, ISO) v závislosti na použité metodě NDT [34].

#### ***Vizuální kontrola (VT)***

Vizuální kontrola se provádí dle ČSN EN ISO 17637 a patří mezi základní, nejjednodušší a nejlevnější metody nedestruktivního zkoušení, kterou se zjišťují povrchové vady svarů jako např. trhliny, póry, zápaly, vruby, studené spoje, vadné napojení atd. Využívá se tzv. přímá vizuální kontrola, kdy není přerušena dráha mezi okem a zkoušeným svarovým spojem. Přípustnost vad musí odpovídat jakosti svarů, zhotovených na stavbě v souladu s požadavky norem ČSN EN 12732 a ČSN EN ISO 5817 a hodnotí se ve stupni jakosti B, C, D. Kontrola svarů se provádí v rozsahu 100 % všech povrchů svarů, v tepelně ovlivněném pásmu a základním materiálu v šířce minimálně 50 mm na obě strany od osy svaru. Svarový spoj, vyhovující vizuální kontrole pro požadovaný stupeň jakosti, splňuje současně podmínku stavu povrchu pro další případnou, vyžadovanou metodu nedestruktivní kontroly [27, 30].

#### ***Kapilární zkouška (PT)***

Kapilární (penetrační) zkouška je určena ke zjišťování povrchových, případně podpovrchových vad, které jsou v kontaktu s povrchem a vycházejí do povrchu, tozn. jsou

otevřené, aby do nich mohla vniknout detekční kapalina. Při zkoušce svarových spojů se jedná zejména o lokalizaci povrchových trhlin, pórů, vrubů, studených spojů, případně ověření těsnosti svarů malých tloušťek.

Podstata kapilární metody spočívá ve využití principu vzlínivosti a smáčivosti vhodných kapalin (penetrantů), jejich barevnosti nebo fluorescence. Po ukončení penetrace ze zkušebního povrchu svaru vzlíná ve vadách zbylý penetrant na povrch a s pomocí kontrastní vývojky vytváří barevnou indikaci vady.

Obecný průběh kapilární zkoušky zahrnuje očištění a odmaštění povrchu, nanesení penetrantu na povrch např. štětcem, nástřikem, poléváním, 5 až 30 minut působení penetrantu pro dostatečné proniknutí do necelistvostí, otření povrchu s odstraněním přebytků penetrantu, nanesení vhodné vývojky, kdy po určité době z případných trhlinek začne na povrch vzlínat penetrant vlivem kapilárních sil, vývojka změni barvu a pro viditelnost vad na denním světle se označuje jako metoda barevné indikace (při ultrafialovém světle se nazývá metoda fluorescenční), hodnocení se provádí vizuálně a výsledek se následně zdokumentuje.

Provedení a vyhodnocení kapilární zkoušky svarových spojů se provádí v plynárenství v souladu s normou ČSN EN 12732 v návaznosti na normy ČSN EN ISO 3452-1 a ČSN EN ISO 23277 [16, 25, 27].

### ***Magnetická prášková zkouška (MT)***

Magnetická prášková zkouška je také určena ke zjišťování povrchových vad, případně vad vyskytujících se těsně pod povrchem, ale s tím rozdílem, že vady nemusejí být spojeny s povrchem. Z hlediska požadavku na stav povrchu není tato metoda tak náročná na přípravu a čistotu zkoušeného povrchu jako zkouška kapilární. Určité omezení vyplývá ze skutečnosti, že metodu lze použít pouze pro feromagnetické materiály, tudíž není vhodná např. pro vysokolegované austenitické oceli, slitiny hliníku, mědi apod.

Podstata metody je založena na zjišťování rozptylu magnetického toku, který vzniká ve zmagnetovaném feromagnetickém materiálu v místě necelistvosti (např. trhliny) nebo náhlé změny magnetických vlastností (např. strusky) při průchodu magnetického toku zkoušeným předmětem. Detekce vad je tedy založena na rozdílu magnetických vlastností mezi zkoušeným materiálem a diskontinuitou, kde dochází k narušení magnetických siločar, respektive rozptylu magnetického pole. Detekovat lze pouze necelistvosti, které se nacházejí kolmo nebo přibližně kolmo na směr magnetického pole, kdy v místě nespojitosti dojde k vychýlení siločar z původního směru a důsledkem je vystoupení magnetického toku na povrch nebo nad jeho povrch a následně k překlenutí vady. Aplikací detekčního

feromagnetického prášku, který je v místě rozptylu intenzivněji přitahován, se vytváří zřetelná stopa, ohraničující necelistvost. Pro detekci všech vad je nutné, aby byly svary zmagetizovány ve dvou směrech se vzájemným úhlem  $60^\circ$  a  $90^\circ$ . Touto metodou lze určit vady typu trhliny, praskliny, zdvojeniny a některé podpovrchové objemové vady.

Magnetická prášková metoda v plynárenství se provádí a v souladu s normami ČSN EN 12732, ČSN EN ISO 17638, ČSN EN ISO 3059 v návaznosti na hodnocení přípustnosti vad dle ČSN EN ISO 23278 [16, 25, 27].

### ***Radiografická zkouška (RT)***

Radiografická zkouška patří mezi základní a nejrozšířenější metody nedestruktivní kontroly svarových spojů a využívá se ke zjišťování vnitřních objemových vad, v plynárenství do tloušťky 8 mm. Zkouška je založena na principu sledování lokální změny intenzity záření prošlého kontrolovaným předmětem, kdy je tato změna intenzity registrována vhodnými detektory, zejména speciálními fotografickými filmy. Vyvoláním filmů následně vzniká trvalý záznam obrazu vnitřních vad zvaný radiogram. Intenzita zeslabení záření je úměrná tloušťce materiálu a rovnoměrná při průchodu materiálem bez vad. V případě vyskytujících se vad má intenzita prošlého záření nerovnoměrný průběh a díky tomu lze posoudit charakter a geometrii zjištěných vad ve skutečné podobě a velikosti.

Zkouška prozářením svarových spojů v plynárenství se provádí v souladu s požadavky ČSN EN 12732 a ČSN EN ISO 17636-1. Přípustnost vad u svarových musí odpovídat stupni jakosti „B“ nebo „C“ dle požadavků norem ČSN EN 12732 a ČSN EN ISO 5817, odpovídající jakosti svarů zhotovených na stavbě [25, 27].

### ***Ultrazvuková zkouška (UT)***

Princip zkoušení materiálů ultrazvukem je založen na šíření mechanického vlnění zkoušeným předmětem, kdy jsou sledovány změny v intenzitě signálu vyvolané interakcí na rozhraní dvou prostředí s rozdílnými akustickými vlastnostmi. Lokalizovaná místa se změnami intenzity signálu zpravidla představují nehomogenity a nespojitosti ve zkoušeném materiálu, tzn. vady jako např. bubliny, trhliny, póry, kovové a nekovové vměstky, studené spoje atd.

V nedestruktivním zkoušení se využívá akustické vlnění o frekvenci v rozsahu 0,5 až 25 MHz. Jestliže dopadá svazek podélných ultrazvukových vln na rozhraní dvou prostředí, dochází k jejich odrazu, případně lomu ultrazvukových vln (na rozhraní kov–vzduch dochází téměř k 100 % odrazu). Podstatou většiny zkoušení je měření ultrazvukové energie, která projde materiálem, nebo se opačně vrátí po odrazu od jiného rozhraní zpět. Pro průchod

ultrazvukových vln mezi ultrazvukovou sondou a materiálem jsou používány vhodné přechodové látky (olej, voda, vazelína), aby byla zajištěna dokonalá akustická vazba.

Základní ultrazvukové metody se dělí na průchodové a odrazové, zkušební přístroj se nazývá ultrazvukový defektoskop. **Metoda odrazová** využívá jednu sondu, která vysílá a zároveň přijímá ultrazvukové vlnění. **Metoda průchodová** využívá dvou sond, kdy jedna sonda vysílá a druhá přijímá ultrazvukové vlnění.

Pokud se ve svaru vyskytuje vada, vlny se odrážejí i na její ploše a vytvářejí tak poruchové echo. **Ultrazvukové zkušební sondy** rozlišujeme **přímé**, které vysílají přímé ultrazvukové vlny, **úhlové**, které vysílají vlny pod určitým úhlem a **dvojité**, které mohou být přímé i úhlové a obsahují dva měniče, jeden pouze vysílá a druhý pouze přijímá. Jejich nespornou výhodou je malé mrtvé pásmo a lze je tak využít i pro tenké materiály.

Zkoušení a vyhodnocení svarových spojů ultrazvukem v plynárenství se provádí v souladu s normami ČSN EN 12732 a ČSN EN ISO 17640 v návaznosti na hodnocení přípustnosti vad dle ČSN EN ISO 11666 [16, 25, 27].

## 4 Experimentální část

Předmětem praktické části je prověřit zvolené jednotlivé trubní materiály a jejich vhodnost ke zhotovení svarového spoje s požadovanými vlastnostmi pro svary, zhotovené na stavbě, zaručující bezpečný provoz VTL plynovodů, při použité metodě svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou a to vyhodnocením provedených nedestruktivních, destruktivních mechanických a metalografických zkoušek svarových spojů u jednotlivých materiálů s využitím norem ČSN EN 12732 a ČSN EN ISO 15614-1. Součástí je i provedení chemické analýzy základních (trubních) materiálů. Pro snadnou identifikaci při manipulaci a práci se zkušebními kusy a vzorky byl zkušební materiál z normalizačně žíhané trubky označován písmenem „N“ a z termomechanicky zpracované trubky označován písmenem „M“. Následně byl takto rozlišován i při zpracování výsledků v textu, fotografiích a tabulkách.

### 4.1 Volba základních trubních a přídavných materiálů

Jako základní trubní materiál byly zvoleny dvě trubky totožné dimenze DN 150, respektive o totožném vnějším průměru a tloušťce ( $D \times t$ ) 168,3 x 5,0 mm, totožné mezi kluzu ale rozdílném tepelně zpracovaném stavu. Zvolené trubky byly dodány ve stavu normalizačně žíhaném a termomechanicky zpracovaném a reprezentují základní povolené trubní materiály pro výstavbu vysokotlakých plynovodů. Jejich přesné označení dle předmětné normy ČSN EN ISO 3183 je L245NE a L245ME, kde písmeno *L* znamená určení pro potrubní aplikace,



číselné označení 245 vyjadřuje hodnotu meze kluzu v MPa a písmena *NE* stav normalizačně žíhaný a *ME* stav termomechanicky zpracovaný. Z důvodu momentální nedostupnosti u dodavatelů byla pro termomechanický zpracovaný stav použita ze skladových zásob ekvivalentní trubka s označením *MB* dle předchozího označení podle evropské normy (ČSN EN 10208-2). Chemické složení základních materiálů dle inspekčních certifikátů 3.1 je uvedeno v rámci chemické analýzy v bodě 4.6.

Jako přídatný materiál byla zvolena bazická elektroda pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí s nízkým obsahem difusního vodíku (H5) v balení VacPac výrobce fy ESAB s označením *OK 48.05* dle *EN ISO 2560-A: E 42 4 B 42 H5* s průměrem elektrody 2,0 a 2,5 mm. Elektroda vykazuje velmi dobré operativní vlastnosti i při velmi nízkých proudech, což je výhodné zejména při svařování tenkostěnných potrubí. Chemické složení přídatných materiálů dle inspekčních certifikátů 3.1 je uvedeno v následující tabulce č. 4 a č. 5.

Tabulka č. 4: Chemické složení svarového kovu elektrody průměru 2,0 mm (*OK 48.05*)

<b>OK 48.05</b>	<b>Obsahy prvků [%]</b>							
<b>LOT: SB516181</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
	0,048	1,00	0,67	0,015	0,008	0,08	0,042	0,01
	<b>V</b>	<b>Nb</b>	<b>Cu</b>	<b>As</b>	<b>Sn</b>	<b>Al</b>	<b>Ti</b>	<b>Pb</b>
	0,027	0,007	0,014	0,0045	0,0032	0,01	0,019	0,001

Tabulka č. 5: Chemické složení svarového kovu elektrody průměru 2,5 mm (*OK 48.05*)

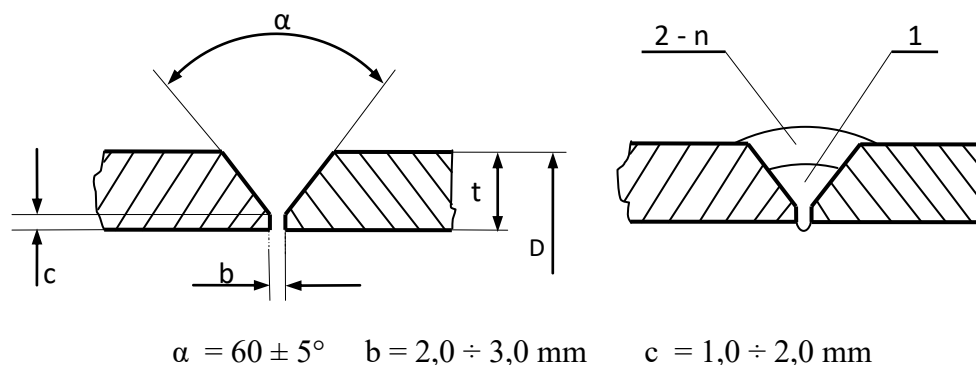
<b>OK 48.05</b>	<b>Obsahy prvků [%]</b>							
<b>LOT: SB517118</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
	0,047	1,01	0,57	0,016	0,009	0,03	0,037	0,01
	<b>V</b>	<b>Nb</b>	<b>Cu</b>	<b>As</b>	<b>Sn</b>	<b>Al</b>	<b>Ti</b>	<b>Pb</b>
	0,028	0,0061	0,012	0,0046	0,0021	0,01	0,018	0,001

## 4.2 Příprava zkušebních kusů a provedení svarových spojů

Z obou trubek byly nařezány dva zkušební kusy o délce 150 mm s následnou úpravou svarových ploch. Příprava svarových ploch a postup svařování (obr. 8) byly provedeny dle předběžné specifikace postupu svařování (pWPS) vyhotovené svářečským dozorem, obsahující všechny potřebné údaje a parametry, ovlivňující jakost při svařování (na základě WPQR vystavená WPS poskytuje požadované proměnné hodnoty při svařování pro konkrétní aplikaci za účelem zajištění opakovatelnosti procesu). Úkosity svarových ploch byly připraveny broušením na požadovaný úhel  $60 \pm 5^\circ$  pro tupé svary. Vlastní svařování bylo provedeno v poloze PH, reprezentující zásadní polohu v praxi při montážním svařování potrubí, odborně způsobilou osobou s platným certifikátem dle EN ISO 9606-1 pro metodu 111 s odpovídajícím rozsahem včetně doplňkové zkoušky, simulující výkop v poloze

svařování PH dle požadavku ČSN EN 12732. Pro kořenovou část byla použita elektroda o průměru 2,0 mm, pro výplňovou a krycí část průměru 2,5 mm. Svařování bylo provedeno při teplotě (nad 5 °C), která dle ČSN EN 12732 nevyžaduje předehřev a dohřev svarových spojů.

Předběžnou specifikaci postupu svařování (pWPS) vypracoval firemní svářečský dozor (technolog) s kvalifikací EWT.



Obr. 8: Tvar spoje s přípravou svarových ploch a postup svařování dle pWPS [35]

Před svařováním se provedla kontrola čistoty svarových ploch a povrchu přiléhajícímu ke svaru minimálně 10 mm od svarové hrany na straně povrchu i kořene svaru, dále kontrola svarového úkosu a kontrola sestavení. Následně byly provedeny svarové spoje jednotlivých zkušebních kusů dle uvedených parametrů v následující tabulce.

Tabulka č. 6: Parametry svařování dle pWPS [35]

Parametry svařování			
Svarová housenka	1	2 - n	
Metoda svařování	111	111	
Průměr přídatného drátu [mm]	2,0	2,5	
Svařovací proud [A]	60-70	75-95	
Svařovací napětí [V]	20-25	20-25	
Druh proudu / polarita	DC / +	DC / +	

Během svařování se prováděla kontrola jednotlivých housenek po jejím svaření (póry, trhliny, zápaly) a čištění jednotlivých vrstev (struska, oxidy, zásahy nářadím do povrchu při čištění svaru).

Po svaření se provedla kontrola čistoty povrchu a přístupného kořene a okolí svaru (odstranění strusky, oxidů, okují, rozstříku apod.) jako nutná příprava pro provedení vizuální kontroly svarů [21, 35, 36].

### 4.3 Nedestruktivní zkoušení svarových spojů

Nedestruktivní zkoušení patří mezi zásadní operace kontroly svařeného úseku ocelového plynovodu a jejich rozsah je určen pro jednotlivé skupiny plynovodů dle tlakové úrovně. Pro zjišťování povrchových vad se provádí vizuální kontrola svarů a zkouška kapilární. Pro zjišťování vnitřních vad se používá zkouška prozářením (do tloušťky 8 mm) a zkouška ultrazvukem (nad 8 mm). Na svařených zkušebních kusech byla provedena všechna nedestruktivní zkoušení před jejich rozřezáním na jednotlivé zkušební vzorky [30, 31].

#### 4.3.1 Vizuální kontrola (VT)

Vizuální kontrola svarových spojů byla provedena v souladu s prováděcím předpisem ČSN EN ISO 17637 a ČSN EN 12732 a to v rozsahu 100% délky obvodových svarů u zkušebních kusů. Ke kontrole byly použity příslušné kalibrované svarové měrky (obr. 9).



*Obr. 9: Použité svarové měrky při vizuální kontrole zkušebních kusů*

Přípustnost vad u svarových spojů byla hodnocena ve stupni jakosti „B“ nebo „C“ (obr. 10) v souladu s požadavky norem ČSN EN 12732 a ČSN EN ISO 5817, odpovídající jakosti svarů, zhotovených na stavbě pro kategorii jakosti plynovodů „D“ dle ČSN EN 12732.



*Obr. 10: Kontrola kořenové vrstvy svaru před rozřezáním*

Vizuální kontrola svarů byla provedena odborně způsobilým pracovníkem dle ČSN EN ISO 9712 a oba svarové spoje požadovanému stupni jakosti „B“ nebo „C“ převážně vyhověly, jak je uvedeno v následující tabulce s parametry a výsledky vizuální kontroly.

Tabulka č. 7: Parametry a výsledky vizuální kontroly vzorků „N“ a „M“

Název vady	Číselný kód vady dle ČSN EN ISO 6520-1	Kategorie jakosti dle ČSN EN 12732 „D“	Stupeň jakosti dle ČSN EN ISO 5817	Vzorek N		Vzorek M	
				Vyhovuje		Vyhovuje	
				ANO	NE	ANO	NE
Trhlina	100	NEPŘÍPUSTNÉ	B	X		X	
Povrchový pór	2017	$d \leq 0,2 T \text{ mm}$	C	X		X	
Kráterová staženina	2024	NEPŘÍPUSTNÉ	B	X		X	
Studený spoj	401	NEPŘÍPUSTNÉ	C	X		X	
Neprovařený kořen	4021	NEPŘÍPUSTNÉ	C	X		X	
Zápal	5011,5012	$h \leq 0,1 T \text{ mm}$	C	X		X	
Vrub v kořeni	5013	$h \leq 0,1 T \text{ mm}$	C	X		X	
Nadměrné převýšení tupého svaru	502	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,15b$	C		X		X
Nadměrné převýšení kořene	504	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,6b$	C	X			X
Strmý přechod svaru	505	$\geq 120^\circ$	ČSN EN 12732		X	X	
Přetečení	506	NEPŘÍPUSTNÉ	B	X		X	
Lineární přesazení	5072	$0,3 T \text{ mm}$	ČSN EN 12732		X	X	
Neúplné vyplnění svaru	511	Krátká vada: $h \leq 0,05 T \text{ mm}$	B	X		X	
Vadné napojení	517	NEPŘÍPUSTNÉ	B	X		X	
Dotek elektrodou	601	NEPŘÍPUSTNÉ	ČSN EN 12732	X		X	
Rozstřík	602	NEPŘÍPUSTNÉ	ČSN EN 12732	X		X	
Stopa po broušení, sekání	604, 605	NEPŘÍPUSTNÉ	--	X		X	

T – tloušťka stěny trubky

h – charakteristický rozměr vady (délka, šířka, hloubky, výška)

d – charakteristický rozměr vady (průměr – bubliny, póry) b – šířka povrchové housenky

Vizuální kontrolou byly zjištěny vady, které již nevyhověly požadovanému stupni jakosti, ale zjištěné závady vykazují povahu méně závažných vad. U obou zkušebních kusů „N“ a „M“ se jednalo o nadměrné převýšení tupého svaru, u zkušebního kusu „N“ navíc o



lineární přesazení tupého svaru (základních materiálů) a strmý přechod svaru. Dle ČSN EN 12732 přípustné lineární vnější přesazení (1,5 mm) bylo u vzorku „N“ překročeno hodnotou až 1,9 mm, taktéž bylo překročeno povolené vnitřní přesazení 1,0 mm na celý obvod trubky.

Po podélném rozřezání obou zkušebních kusů byly opět vizuálně zkontrolovány plně přístupné kořenové vrstvy obou zkušebních kusů „N“ a „M“ (obr. 11) a to s vyhovujícími výsledky, kromě vnitřního přesazení u zkušebního kusu „N“ a v jednom případě nevyhovující nadměrné převýšení kořene u zkušebního kusu „M“ [25, 36-39].



*Obr. 11: Kontrola kořenové vrstvy svarů u zkušebních kusů „N“ a „M“ po rozřezání*

#### **4.3.2 Kapilární zkouška (PT)**

Kapilární (penetrační) zkouška svarových spojů byla provedena v souladu s požadavkem předmětné normy v plynárenství ČSN EN 12732 v návaznosti na prováděcí předpisy norem ČSN EN ISO 3452-1 a ČSN EN ISO 23277 a to v rozsahu 100 % délky obvodových svarů u zkušebních kusů (obr. 12). Relevantní indikace byly hodnoceny ve stupni přípustnosti 2X podle ČSN EN ISO 23277.



*Obr. 12: Zkušební kusy „N“ a „M“ po provedené kapilární zkoušce*

Kapilární zkouška svarů byla provedena odborně způsobilým pracovníkem dle ČSN EN ISO 9712 a u obou svarových spojů nebyly zjištěny indikace, které vyvolaly povrchové necelistvosti a tudíž byly hodnoceny jako vyhovující [25].

Tabulka č. 8: Parametry a výsledky kapilární zkoušky

<b>Materiál:</b> L245NE, L245MB		<b>Metoda svařování:</b> 111		<b>Typ spoje:</b> 2x tupý svarový spoj na trubce		<b>Stav povrchu:</b> běžný	
<b>Zkušební postup:</b> ČSN EN ISO 3452-1		<b>Stadium výroby:</b> po svaření		<b>Hodnocení / stupeň přípustnosti:</b> ČSN EN ISO 23277 – 2X			
<b>Penetrant:</b> V 88		Číslo šarže: 30146		Výrobce: Helling		Zkušební teplota: 21 °C	
<b>Čistič:</b> V 87		Číslo šarže: R 30808		Penetrační čas: 15 min.		Osvětlení: > 1000 lx	
<b>Vývojka:</b> V 89		Číslo šarže: R 31007		Vyvíjecí čas: 10 min.		Dočištění: ano	
<b>Rozsah zkoušení:</b>				100 % povrchu svarů + min. 10 mm na obě strany			
<b>Odchytky od zkušebního postupu:</b>				Nebyly žádné odchytky			
<b>Označení materiálu</b>	<b>Rozměr D x t (mm)</b>	<b>Označení vzorku</b>	<b>Druh Vady</b>	<b>Velikost vady</b>	<b>Poloha vady</b>	<b>Vyhovuje</b>	
						<b>ANO</b>	<b>NE</b>
L245NE	168,3 x 5,0	N	--	--	--	X	
L245MB	168,3 x 5,0	M	--	--	--	X	

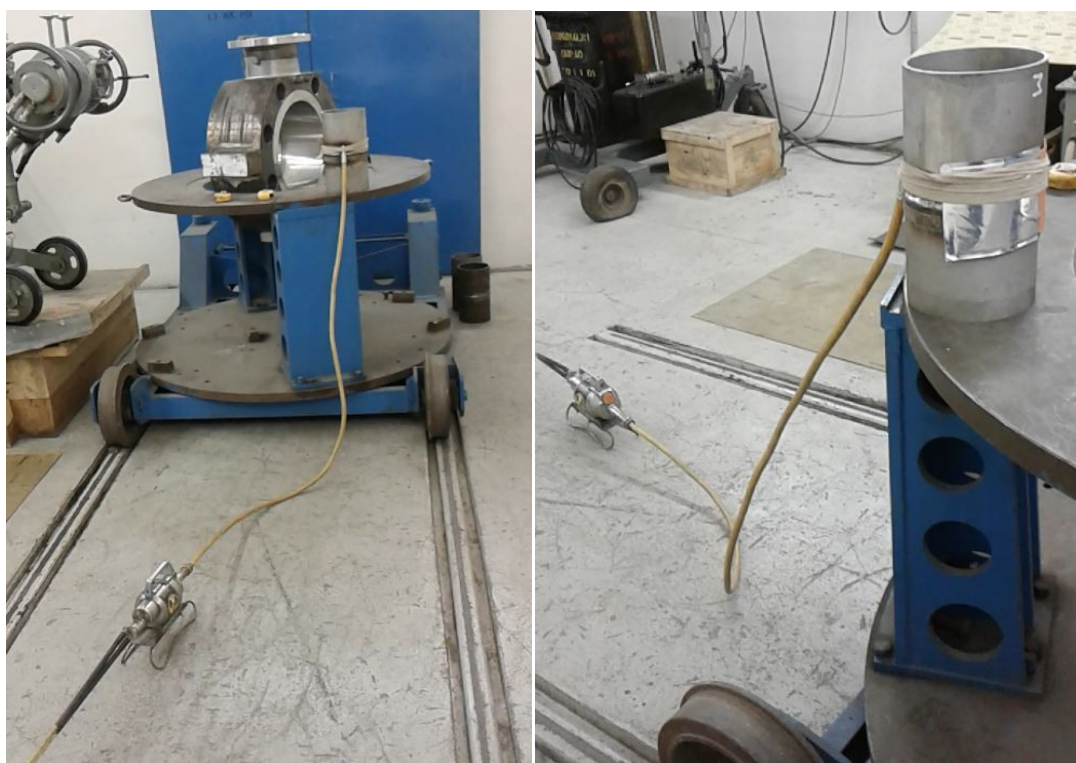
#### 4.3.3 Radiografická zkouška (RT)

Zkouška prozářením patří mezi nejpoužívanější metodu k zjišťování vnitřních vad v plynárenství do tloušťky 8 mm a z hlediska výskytu vad velice obávanou pro svářeče. Ze zkušeností z praxe se předpokládalo, že i ve zkušebních kusech se jisté vady vyskytnou a bude nutné je vyhodnotit a zařadit do příslušného stupně jakosti s následným přiřazením ke skupině plynovodů, pro kterou bude svarový spoj ještě vyhovující. Nejčastěji se ve svarových spojkách vyskytují vady, které lze pomocí zkoušky prozářením dobře identifikovat (objemové vady) např. vady typu póry, protáhlé póry nebo shluk pórů, struskové vměstky apod., další vady např. neprůvar kořene (nenatavené hrany jak na straně kořene tak i na straně lící), lze pozorovat i vnější vady typu krápníky a typu zápaly (vruby), které se ale hodnotí jako povrchové vady v rámci přístupné vizuální kontroly. Ke zkoušce prozářením byl jako zdroj záření použit izotop Ir-192 (obr. 13).



*Obr. 13: Použitý zdroj záření izotop Ir-192*

Radiografická zkouška svarových spojů byla provedena v souladu s prováděcím předpisem ČSN EN 12732 a ČSN EN ISO 17636-1 a to prozářením přes dvě stěny (obraz 1) s počtem 3 expozic (obr. 14). Přípustnost vad u svarových spojů byla hodnocena ve stupni jakosti „B“ nebo „C“ v souladu s požadavky norem ČSN EN 12732 a ČSN EN ISO 5817 pro jakost svarů, zhotovených na stavbě a kategorii jakosti plynovodů „D“ dle ČSN EN 12732.



*Obr. 14: Provedení zkoušky prozářením (RT)*

Zkouška byla provedena odborně způsobilým pracovníkem dle ČSN EN ISO 9712 a oba svarové spoje vyhověly i se zjištěnými vadami „pór a protáhlý pór“ stupni jakosti „B“ dle



ČSN EN ISO 5817, tudíž jsou vyhovující pro nejvyšší kategorii jakosti plynovodů „D“ dle ČSN EN 12732. Parametry a výsledky zkoušky jsou uvedeny v následující tabulce [25, 38].

Tabulka č. 9: Parametry a výsledky zkoušky prozářením

<b>Zdroj záření: Ir 192</b>		<b>Film: C4</b>		<b>Způsob prozáření: přes dvě stěny</b>			
<b>Aktivita: 1490 GBq</b>		Expozice: 24 s		Vzdálenost zdroj – film: 168,3 mm			
<b>Měrka: 10FEEN</b>		Jakost obrazu: W12		Velikost ohniska: 2 x 2 mm			
<b>Typ svaru: V</b>		Třída radiogramu: A		Zčernání filmu: 2,6 – 3,5			
Materiál trubky	Rozměr D x t (mm)	Označení svaru	Označení snímku	Číselný kód vady dle ČSN EN ISO 6520-1	Stupeň jakosti dle ČSN EN ISO 5817	Vyhovuje	
						ANO	NE
L245NE	168,3 x 5,0	N	0 - A	2011,501	B	X	
L245NE	168,3 x 5,0	N	A - B	2015	B	X	
L245NE	168,3 x 5,0	N	B - 0	2011	B	X	
L245MB	168,3 x 5,0	M	0 - A	2011	B	X	
L245MB	168,3 x 5,0	M	A - B	2011,2015	B	X	
L245MB	168,3 x 5,0	M	B - 0	--	B	X	

#### 4.4 Destruktivní mechanické zkoušky svarových spojů

Pro požadované destruktivní mechanické a metalografické zkoušky byly z trubních zkušebních kusů odebrány zkušební vzorky v dostatečném rozsahu a množství tak, aby bylo možné zajistit provedení všech požadovaných zkoušek dle ČSN EN ISO 15614-1. Odebrání vzorků bylo provedeno metodou (řezáním), která při dělení materiálu vyloučí jejich tepelné ovlivnění (obr. 15).



Obr. 15: Hydraulicko-gravitační pila na kov PILOUS ARG 300 plus H

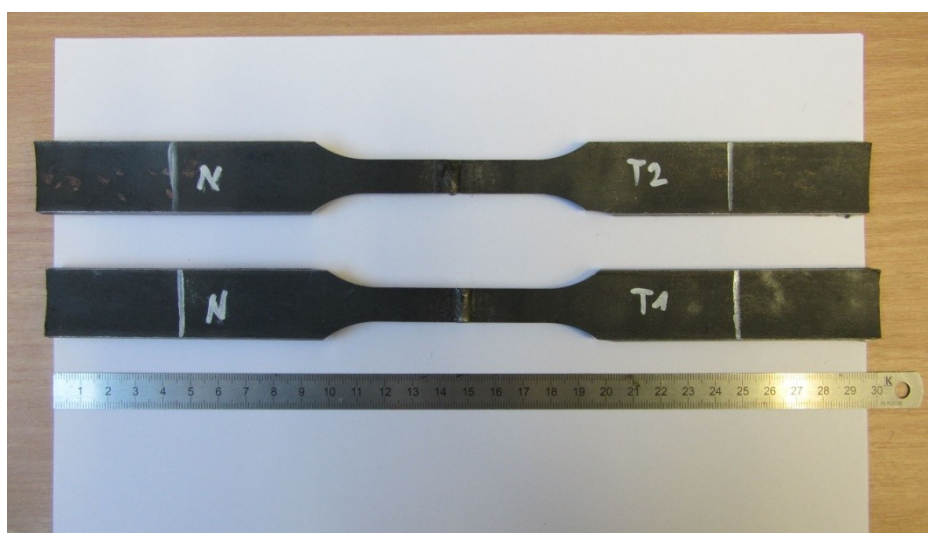


#### 4.4.1 Příčná zkouška tahem

Příčnou zkouškou v tahu dle ČSN EN ISO 4136 byla zkoumána pouze mez pevnosti v tahu. Další běžně zjišťovaná pevnostní mechanická vlastnost materiálu a to mez kluzu není u svařených vzorků požadována, jelikož nelze přesně stanovit, v které oblasti vzorku (základní materiál, svarový kov, tepelně ovlivněná zóna) dochází k počáteční plastické deformaci.

Výsledná pevnost v tahu jak ve svaru, tak i v tepelně ovlivněné zóně musí vykazovat stejnou nebo vyšší hodnotu než materiálově specifikovaná pevnost v tahu trubního (základního) materiálu.

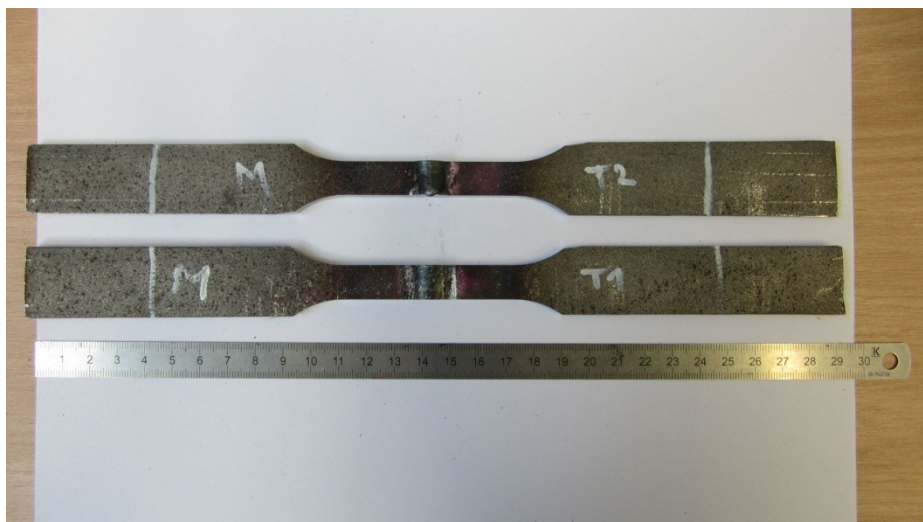
Z každého trubního kusu byly pro tuto zkoušku odebrány dva vzorky, které byly následně obrobeny do finálního tvaru a rozměru dle normy ČSN EN ISO 4136 (obr. 16, 18).



*Obr. 16: Obrobené zkušební tyče vzorku „N“*



*Obr. 17: Zřetelné lineární přesazení zkušebních tyčí vzorku „N“*



*Obr. 18: Obrobené zkušební tyče vzorku „M“*



*Obr. 19: Trhací stroj ZWICK/ROELL Z150*



*Obr. 20: Přetržená zkušební tyč v trhacím stroji*

Požadované kritérium pro schválení zkoušky je stanoveno dle materiálových listů trubních materiálů (inspekčních certifikátů 3.1 dle ČSN EN 10204) jako nižší hodnoty meze pevnosti z příslušných taveb, které představují  $R_m \text{ min.} = 512 \text{ MPa}$  pro zkušební vzorek „N“ a  $R_m \text{ min.} = 447 \text{ MPa}$  pro zkušební vzorek „M“ v souladu s normou ČSN EN ISO 15614-1.

Tabulka č. 10: Parametry a výsledky příčné zkoušky tahem

Vzorek	Teplota (°C)	A (%)	Z (%)	$R_{p0,2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	Místo porušení	Výsledek
N-T1	+25	--	--	--	515	mimo svar	vyhovující
N-T2	+25	--	--	--	521	mimo svar	vyhovující
M-T1	+25	--	--	--	456	mimo svar	vyhovující
M-T2	+25	--	--	--	457	mimo svar	vyhovující
Kritérium zkoušky pro vzorek N:				$R_m \text{ min.} = 512 \text{ MPa}$			
Kritérium zkoušky pro vzorek M:				$R_m \text{ min.} = 447 \text{ MPa}$			

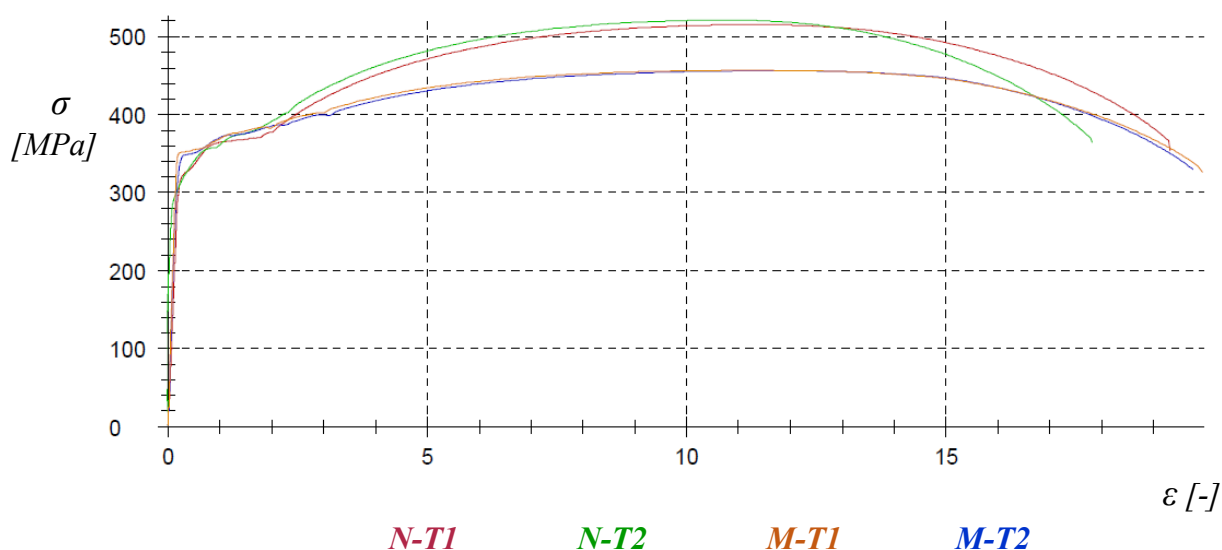
Zkouška byla provedena na trhacím stroji ZWICK/ROELL Z150 ve zkušební laboratoři SIMD, VŠB-TU Ostrava.

Dle průběhů (obr. 22) a výsledků tahové zkoušky, uvedených v tabulce č. 10 je zřejmé, že zkušební tyče vzorku „N“ i „M“ splnily kritérium zkoušky a to nižší hodnoty meze pevnosti z příslušné tavby a s místy porušení mimo svary (obr. 21). Nicméně lze podotknout, že naměřené hodnoty obou vzorků by splnily i kritérium s vyšší hodnotou meze pevnosti z příslušné tavby. Tahovou zkouškou u vzorku „N“ se navíc prokázalo, že již nevyhovující přesazení povrchů nad přípustné hodnoty 1,5 mm na straně lící a 1,0 mm na straně kořene neovlivnilo vyhovující výsledek tahové zkoušky. V případě zkušební tyče T1 se jednalo o nejvyšší přesazení povrchů 1,7 mm na straně kořene, u zkušební tyče T2 se jednalo o přesazení povrchů 1,8 mm na straně lící a 1,7 mm na straně kořene (obr. 17). Vzorek přetržené zkušební tyče v příslušném trhacím stroji (obr.19) je znázorněn na obr. 20 [33, 40].



Obr. 21: Přetržené zkušební tyče vzorků „N“ a „M“ s místem porušení mimo svary





Obr. 22: Grafický průběh tahové zkoušky (závislosti deformace  $\epsilon$  – napětí  $\sigma$ )

#### 4.4.2 Příčná zkouška lámavosti

Zkouškou lámavosti respektive zkouškou ohybem dle ČSN EN ISO 5173 se vyhodnocuje jakost svarového spoje zejména z hlediska jeho deformačních schopností tupých svarových spojů. Použitý únavový stroj k provedení zkoušky je znázorněn níže (obr. 23).



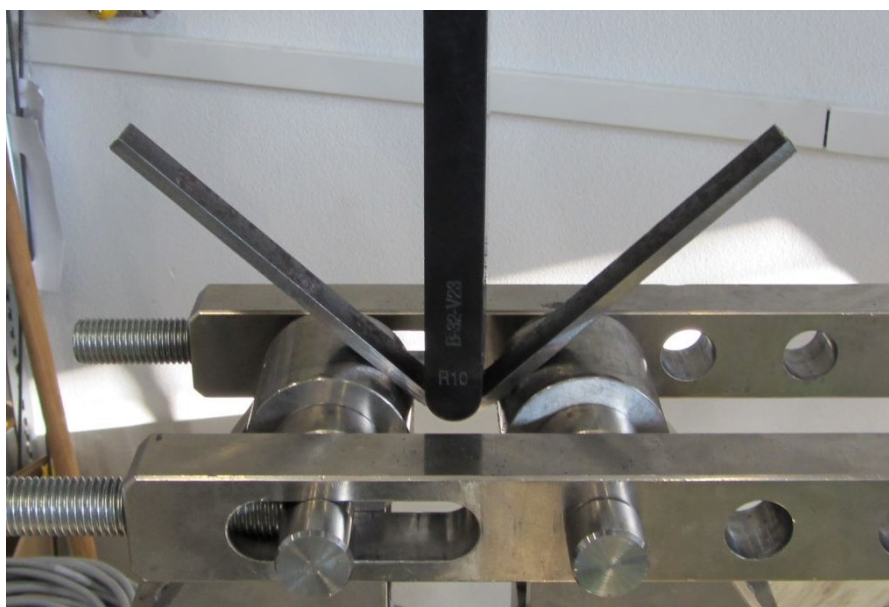
Obr. 23: Únavový stroj Inova FU-O-350-1700-VI

Princip spočívá v ohnutí ploché tyče v místě svaru okolo zkušební trnu do požadovaného úhlu ohybu. Zkušební tyče pro příčnou zkoušku lámavosti o rozměru 300 x 20 x 5 mm (obr. 24) byly odebrány napříč svarovým spojem, které byly následně při zkoušce deformovány jednostranným ohybem tak (obr. 25), že byly nezávisle na sobě zkoušeny obě strany svaru. Dva vzorky byly zkoušeny ze strany kořenové a dva vzorky ze strany povrchové (lícni), kdy byly za pokojové teploty vystaveny namáhání v ohybu. Po dosažení předepsaného úhlu 180° (obr. 26) byla provedena kontrola vnějšího (taženého) povrchu tyče včetně bočních

stran na výskyt trhlin, kdy za vyhovující lze považovat vzorek bez porušení celistvosti materiálu nebo výskytu trhlin (obr. 27).



*Obr. 24: Připravené obrobené zkušební tyče vzorků „N“ a „M“*



*Obr. 25: Zkouška lámavosti na únavovém stroji*



*Obr. 26: Dokončený ohyb zkušební tyče na požadovaný úhel 180°*

Tabulka č. 11: Parametry a výsledky příčné zkoušky lámavosti

Vzorek	Teplota (°C)	Ø trnu (mm)	Vzdálenost podpěr (mm)	Úhel ohybu (°)	Tažená strana	Nález	Výsledek
N-01	+23	20	34	180	kořen	bez vady	vyhovující
N-02	+23	20	34	180	kořen	bez vady	vyhovující
N-03	+23	20	34	180	povrch	bez vady	vyhovující
N-04	+23	20	34	180	povrch	bez vady	vyhovující
M-01	+23	20	34	180	kořen	bez vady	vyhovující
M-02	+23	20	34	180	kořen	bez vady	vyhovující
M-03	+23	20	34	180	povrch	bez vady	vyhovující
M-04	+23	20	34	180	povrch	bez vady	vyhovující

Zkouška byla provedena na únavovém stroji pro ohyb Inova FU-O-350-1700-V1 ve zkušební laboratoři SIMD, VŠB-TU Ostrava.



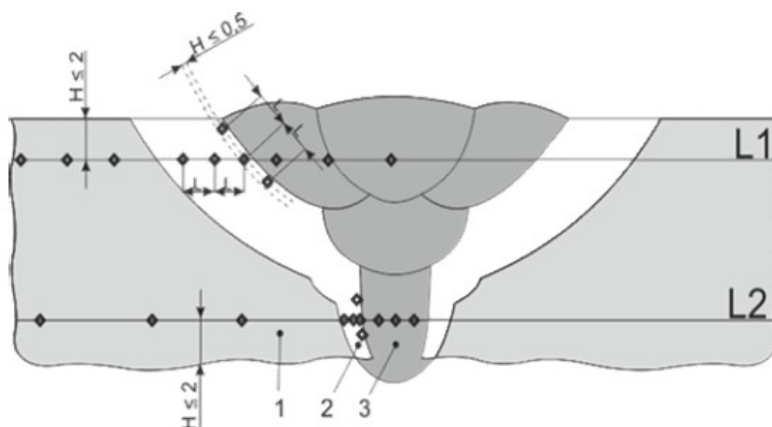
Obr. 27: Vyhovující zkoušená kořenová a lící strana vzorku „N“ a „M“

Provedenou kontrolou vnějších (tažených) povrchů u všech vzorků bylo prokázáno, že nebyly zjištěny trhliny nebo jiné porušení celistvosti materiálu a tudíž výsledek zkoušky lze označit za vyhovující v souladu s normou ČSN EN ISO 15614-1 [33, 41].

#### 4.4.3 Zkouška tvrdosti

Zkoušení tvrdosti podle Vickerse HV 10 se provádí v souladu s normou ISO 9015-1. Místa odběru a rozměry zkušebních vzorků byly stanoveny v souladu s předpisem ČSN EN ISO 15614-1 čl. 7.4.5 a zkouška byla provedena na odebraných svařených vzorcích při teplotě 20°C. Pro materiály tloušťky 5 mm a méně se vyžaduje, aby vtisky byly provedeny pouze

v jedné řadě do hloubky 2,0 mm pod povrchem. V tepelně ovlivněném pásmu je požadováno, pokud je to možné, aby první vtisk byl umístěn co nejblíže hranice natavení (obr. 28).



*Obr. 28: Rozložení jednotlivých vtisků ve svarovém spoji*

Měření a hodnocení průběhu tvrdosti bylo provedeno napříč svarovým spojem v jednotlivých jeho oblastech a to ve svarovém kovu, v tepelně ovlivněných zónách a v základním materiálu (obr. 28). Pro každou řadu vtisků byly provedeny tři jednotlivé vtisky v oblasti svarového kovu a v obou základních materiálech a pět jednotlivých vtisků v obou tepelně ovlivněných pásmech, vše pod povrchem jak u lící tak i u kořenové strany.



*Obr. 29: Instrumentovaný tvrdoměr ZWICK ZHU 2,5*

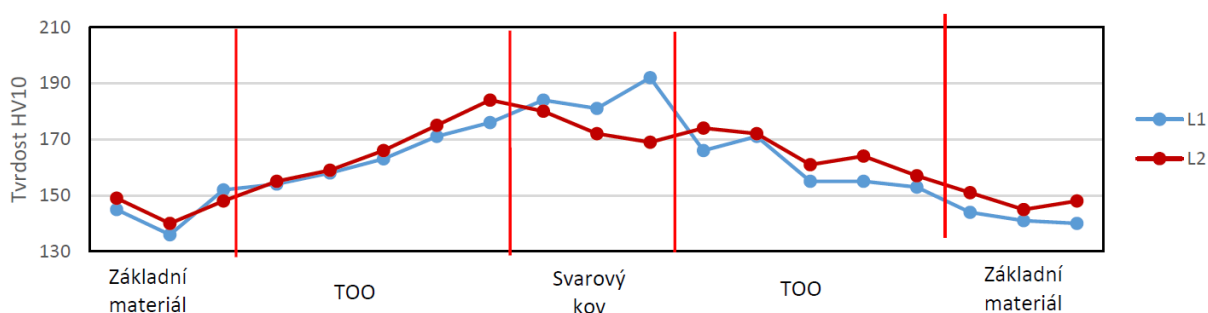
Naměřené hodnoty tvrdosti na příslušném přístroji (obr. 29) jsou ve všech požadovaných oblastech svarového spoje vyhovující, protože v žádném případě nedosahují maximální přípustné hodnoty tvrdosti 380 jednotek HV 10 dle požadavku ČSN EN ISO 15614-1, jak je patrné z následující tabulky.



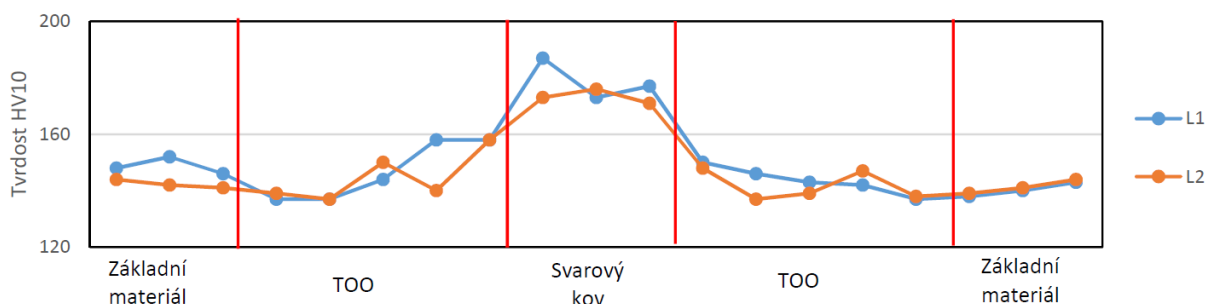
Tabulka č. 12: Naměřené hodnoty tvrdosti podle Vickerse HV 10

Vzorek / strana	ZM	TOZ	SK	TOZ	ZM	Výsledek
N - lícní	145,136 152	154,158,163 171,176	184,181 192	166,171,155 155,153	144,141 140	vyhovující
N - kořenová	149,140 148	155,159,166 175,184	180,172 169	174,172,161 164,157	151,145 148	vyhovující
M - lícní	148,152 146	137,137,144 158,158	187,173 177	150,146,143 142,137	138,140 143	vyhovující
M - kořenová	144,142 141	139,137,150 140,158	173,176 171	148,137,139 147,138	139,141 144	vyhovující
Vzorek N:	min. 136 HV 10			max. 192 HV 10		
Vzorek M:	min. 137 HV 10			max. 187 HV 10		
Kriterium zkoušky:	max. 380 HV 10					

Zkouška byla provedena na instrumentovaném tvrdoměru ZWICK ZHU 2,5 ve zkušební laboratoři SIMD, VŠB-TU Ostrava.



Obr. 30: Grafický průběh rozložení tvrdosti svarového spoje u vzorku „N“



Obr. 31: Grafický průběh rozložení tvrdosti svarového spoje u vzorku „M“

Z porovnání průběhů rozložení tvrdosti u jednotlivých vzorků (obr. 30, 31) vyplývá, že významnější rozdíl se projevil v TOZ svarových spojů. U vzorku „N“ nastal pozvolný pokles tvrdosti od svarového kovu směrem k základnímu materiálu, zatímco u vzorku „M“ došlo k náhlému a výraznějšímu poklesu tvrdosti od svarového kovu směrem k základnímu materiálu, což signalizuje i určitý pokles pevnosti. Tento signalizující pokles mechanických



vlastností souvisí s ohřevem a tepelným ovlivněním materiálu nad limitní teplotu 580°C, kdy již dochází k vyrušení příznivého účinku termomechanického zpracování.

Celková minima a maxima naměřených tvrdostí jsou u obou vzorků přibližně stejná, nejvyšší hodnoty vykazuje shodně svarový kov, jelikož použitý přídavný materiál vykazuje dle příslušných atestů vyšší pevnostní vlastnosti než základní materiál. Opačně, nejnižší hodnoty jsou vykazovány rozdílně, u základního materiálu v případě vzorku „N“ a v tepelně ovlivněné zóně v případě vzorku „M“, kde byl v porovnání se základním materiálem naměřen pouze mírný pokles tvrdosti [33, 42].

#### **4.5 Destruktivní metalografické zkoušky svarových spojů**

Metalografické hodnocení svarových spojů běžně doplňuje mechanické zkoušky materiálů při ověřování jeho vlastností, především stavu struktury materiálu a svarových spojů. Metalografické zkoušky se dělí na makroskopickou a mikroskopickou kontrolu, kde se provádí analýza vzorku příčného řezu zkoušeným svarem. Tyto kontroly se používají k odhalení vad a jiných makroskopických a mikroskopických charakteristik svarového spoje (struktury, morfologie, vměstků, precipitátů, trhlin nebo jiných dutin), kdy lze k pozorování použít optický, nebo elektronový mikroskop. Před prováděním metalografických rozborů je nutné zajistit dokonalou přípravu zkušebních vzorků, tzn. mechanické dělení a opracování, broušení, leštění a leptání. Výsledky se dokladují fotografickou dokumentací. Je ale nutné brát v úvahu skutečnost, že kontrola makrostruktury a mikrostruktury se uskutečňuje pouze na řezu svarovým spojem a tudíž se hodnotí jen to, co se na dané ploše výbrusu vyskytuje [6, 16, 43].

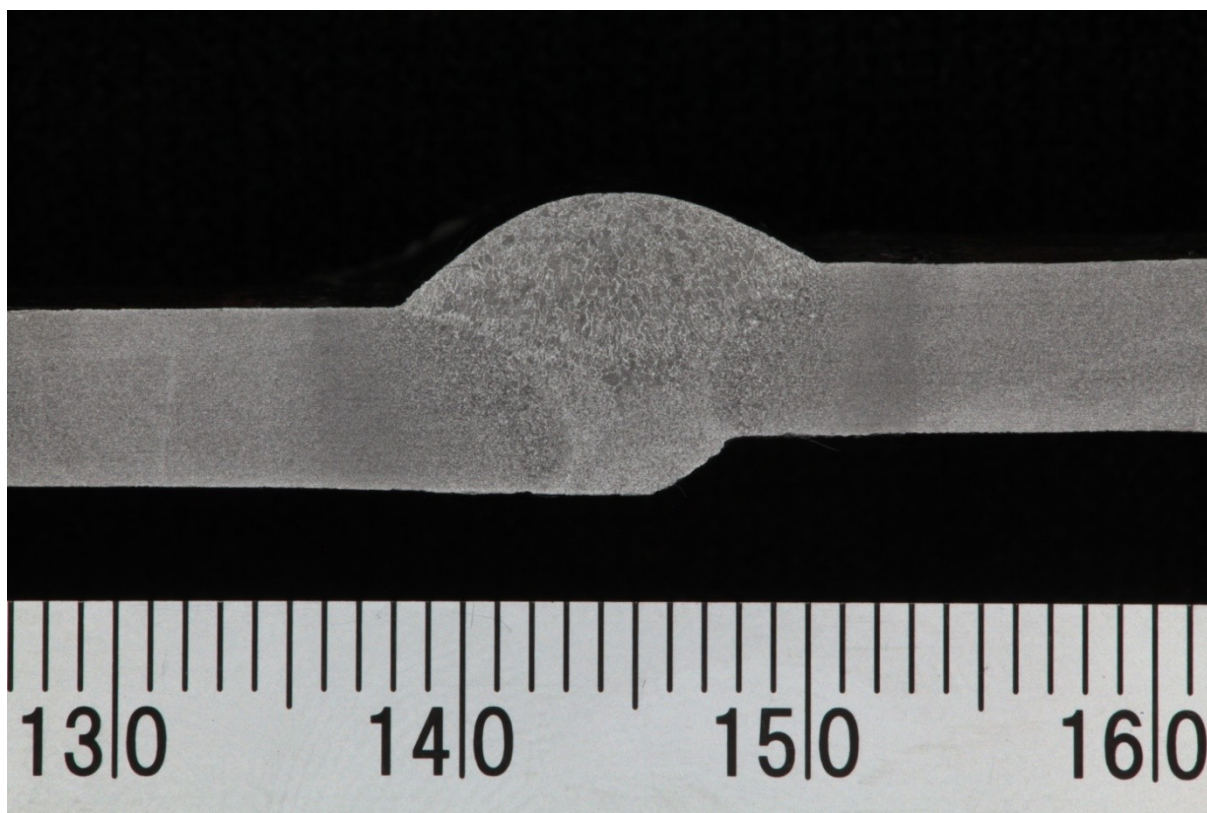
##### **4.5.1 Makrostrukturní rozbor**

Makroskopická kontrola se provádí prohlídkou připraveného vzorku příčného řezu svarem pouhým okem nebo při malém zvětšení (menším než 50x) v nenaleptaném nebo v naleptaném stavu v souladu s normou ČSN EN ISO 17639 (obr. 32). Tato kontrola se u svarových spojů používá pro hodnocení zejména tvaru svaru, odmíšení svarového kovu, způsobu kladení a spojení svarových housenek, zkoumá se tvar, šířka a charakter TOZ, hranice natavení, průvar kořene a výskyt případných vad. Kontrolovaný povrch vzorků nesmí být přípravnými procesy nijak negativně ovlivněn (např. tepelně), k leptání jsou používány leptadla podle ISO/TR 16060.



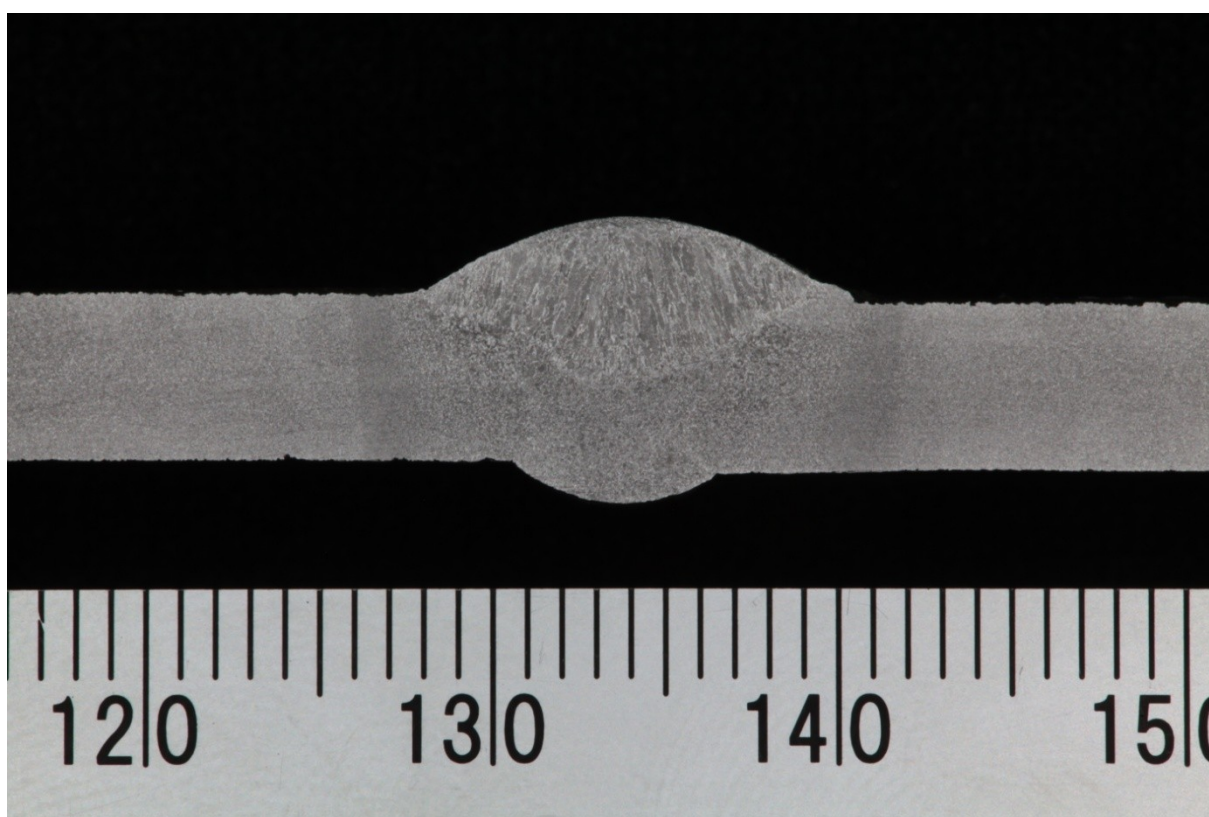
*Obr. 32: Metalografické vybavení*

Vzorky byly vhodně připraveny rozřezáním, zalitím pryskyřicí, vybroušením, a leptáním roztokem Nital 4 %. Zkušební vzorek byl připraven a naleptán podle prováděcího předpisu ISO 17639 na jedné straně tak, aby byla jasně patrná hranice natavení, tepelně ovlivněná zóna a způsob kladení housenek. Zkušební vzorky dle požadavku zahrnovaly i neovlivněný základní materiál a byly zhotoveny dokumentační snímky makrostruktury obou vzorků „N“ a „M“ (obr. 33, 34).



*Obr. 33: Snímek makrostruktury zkušebního vzorku „N“*

Na snímku makrostruktury vzorku „N“ (obr. 33) je patrné rozhraní mezi svarovým kovem, TOZ a základním materiálem. Šířka TOZ se pohybuje od velikosti 2 mm do 6 mm. V příčném řezu od povrchové do středové oblasti svarového kovu je zřetelná hrubozrnná struktura, kde došlo k rychlejšímu ochlazení a která se postupně zjemňuje směrem k základnímu tepelně neovlivněnému materiálu (zjemnění zrna uvnitř oblasti nad teplotou  $A_3$ ). Lze zřetelně pozorovat nevyhovující lineární přesazení základních materiálů, ovlivňující tvar svaru. Téměř v celém příčném řezu po obou stranách je patrné promísení svarového kovu se základním materiálem, hranice natavení, způsob kladení a spojení svarových housenek je vyhovující, průvar kořene je vzhledem k lineárnímu přesazení dostačující.



*Obr. 34: Snímek makrostruktury zkušebního vzorku „M“*

Na snímku makrostruktury vzorku „M“ (obr. 34) je také patrné rozhraní mezi svarovým kovem, TOZ a základním materiálem. Šířka TOZ se pohybuje od velikosti 2 mm do 5 mm. V příčném řezu od povrchové do středové oblasti svarového kovu je zřetelná hrubozrnná struktura, kde došlo k rychlejšímu ochlazení a která se postupně zjemňuje směrem k základnímu tepelně neovlivněnému materiálu (zjemnění zrna uvnitř oblasti předchozích housenek nad teplotou  $A_3$ ). V celém příčném řezu po obou stranách lze pozorovat promísení svarového kovu se základním materiálem, hranice natavení, způsob kladení a spojení svarových housenek je vyhovující, průvar kořene je vyhovující.

Tabulka č. 13: Stupně přípustnosti pro vady dle ČSN EN ISO 15614-1

Název vady	Kód vady dle ČSN EN ISO 6520-1	Úroveň 2 Stupeň kvality dle ČSN EN ISO 5817	Nález vzorek N	Nález vzorek M
Trhlina	100	B (NEPŘÍPUSTNÉ)	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Studený spoj (neúplné roztavení)	401	B (NEPŘÍPUSTNÉ)	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Neprovařený kořen	4021	B (NEPŘÍPUSTNÉ)	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Souvislý zápal	5011	C	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Nesouvislý zápal	5012			
Nadměrné převýšení tupého svaru	502	C	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Nadměrné převýšení kořene	504	C	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Strmý přechod svaru	505	C	VYHOVUJE	VYHOVUJE
Všechny ostatní vady	-	B	NEVYHOVUJE	VYHOVUJE

Kontrola byla provedena pomocí metalografického přístrojového vybavení ve zkušební laboratoři SIMD, VŠB-TU Ostrava.

Provedením kontroly při 2x násobném zvětšení podle prováděcího předpisu ČSN EN ISO 17639 a vyhodnocením charakteristických znaků a případných vad dle požadavku jakosti v souladu s normou ČSN EN ISO 15614-1 v návaznosti na ČSN EN ISO 5817 bylo zjištěno, že stupni jakosti B/C dle ČSN EN ISO 5817 vyhověl bez výhrad zkušební vzorek „M“. Zkušební vzorek „N“ nevyhověl pouze překročením lineárního přesazení jak na lící tak i na kořenové straně dle požadavku ČSN EN 12732, které je zařazeno v tabulce č. 13 mezi „všechny ostatní vady“ [6, 38, 43].

#### 4.5.2 Mikrostrukturní rozbor

Mikroskopickým rozbohem je zkoumána mikrostruktura materiálu v řezu vzorku, který je také orientován příčně k ose svaru a používá se k pozorování jednotlivých oblastí svarového spoje, respektive detailů ve struktuře metalografického výbrusu zkušební vzorku při zvětšení až 2000x při použití optických mikroskopů.

Rozbor mikrostruktury byl proveden dle prováděcích předpisů ČSN EN ISO 15614-1 a ČSN EN ISO 17639, který zahrnoval přípravu metalografických výbrusů vzorků, vyvolání mikrostruktury leptáním, pozorování vzorku v optickém mikroskopu a následné vyhodnocení s pořízenou fotodokumentací. Odebrané vzorky byly připraveny zalitím, broušením, leštěním a pro vyvolání mikrostruktury naleptány 4% roztokem Nital. Pozorováním (obr. 35) byly zkoumány strukturní složky a fáze ve svarovém kovu včetně TOZ, jednotlivá zrna materiálu, hranice zrn a také detaily vad. Vyhotovené snímky mikrostruktury byly pořízeny pro každou



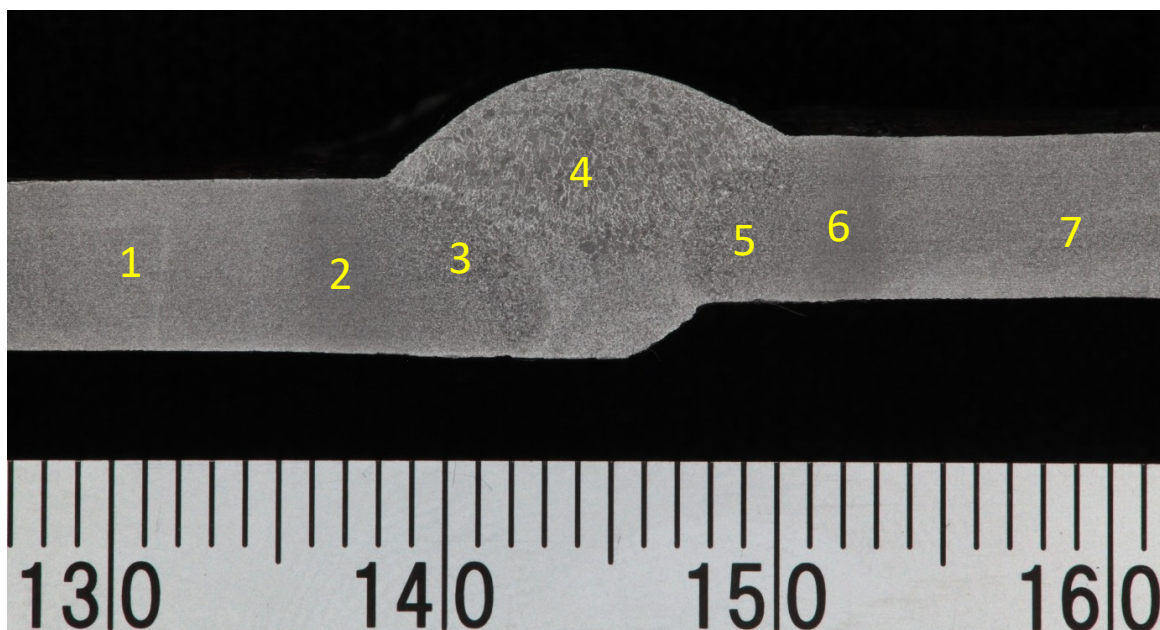
oblast svarového spoje samostatně, tzn. pro svarový kov, jednotlivá pásma TOZ a základní materiál. [6, 16, 43].

*Rozbor byl proveden pomocí metalografického mikroskopu OLYMPUS GX51 (digitální barevná kamera DP73 - Olympus 17.28 MP) ve zkušební laboratoři SIMD, VŠB-TU Ostrava.*

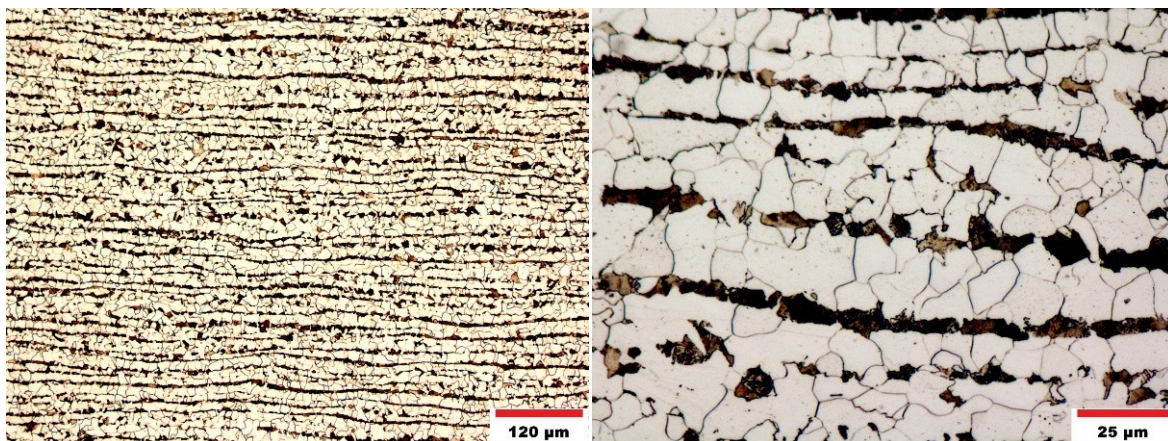


*Obr. 35: Metalografický mikroskop OLYMPUS GX51*

***Mikrostrukturní rozbor zkušebního vzorku „N“***

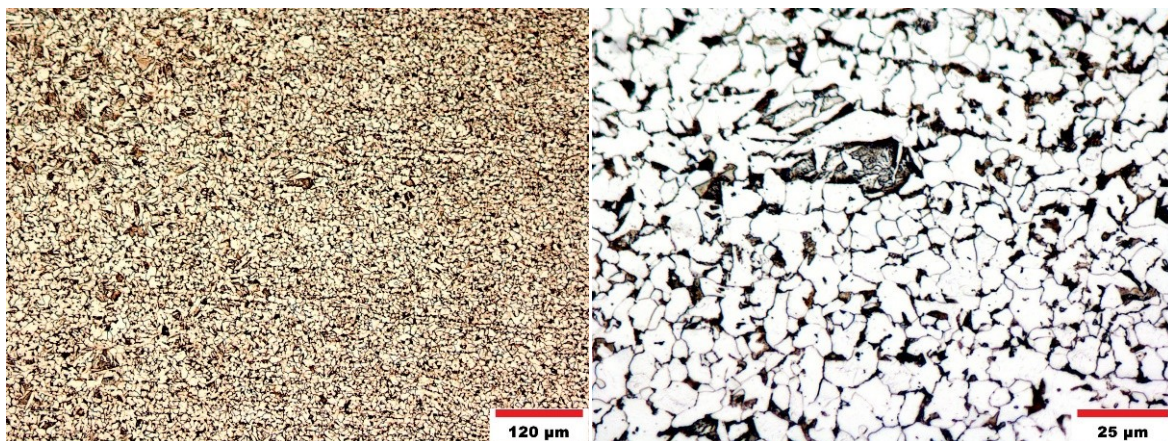


*Obr. 36: Rozložení zkoumaných oblastí mikrostruktury u zkušebního vzorku „N“*



*Obr. 37: Oblast 1 – mikrostruktura ZM u zkušebního vzorku „N“*

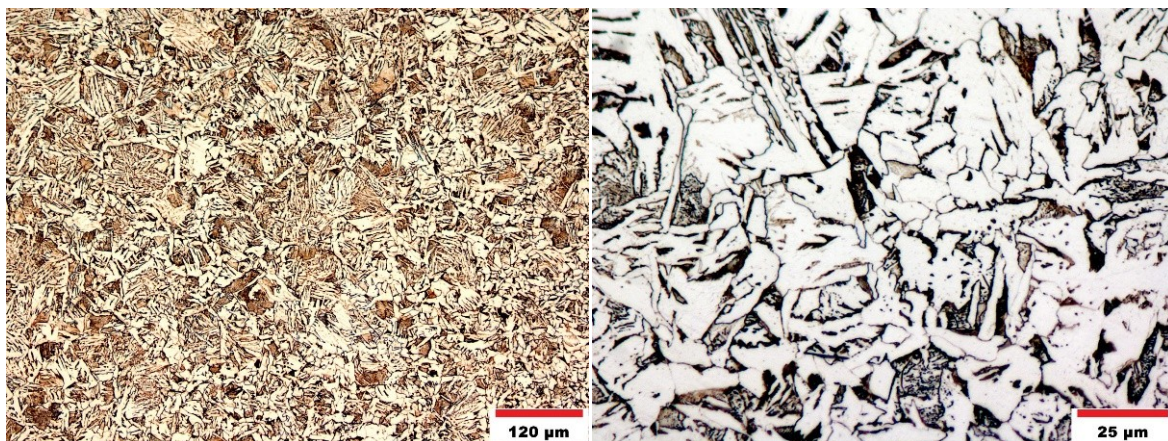
V oblasti 1 základního materiálu (obr. 37) je zřetelné typické řádkovité uspořádání feriticko – perlitické struktury, která se běžně vyskytuje u nízkouhlíkových konstrukčních ocelí. Základní materiál vykazuje jemnozrnnou strukturu a řádkovité uspořádání struktury je projevem válcování ve směru tváření.



*Obr. 38: Oblast 2 – mikrostruktura TOZ u zkušebního vzorku „N“*

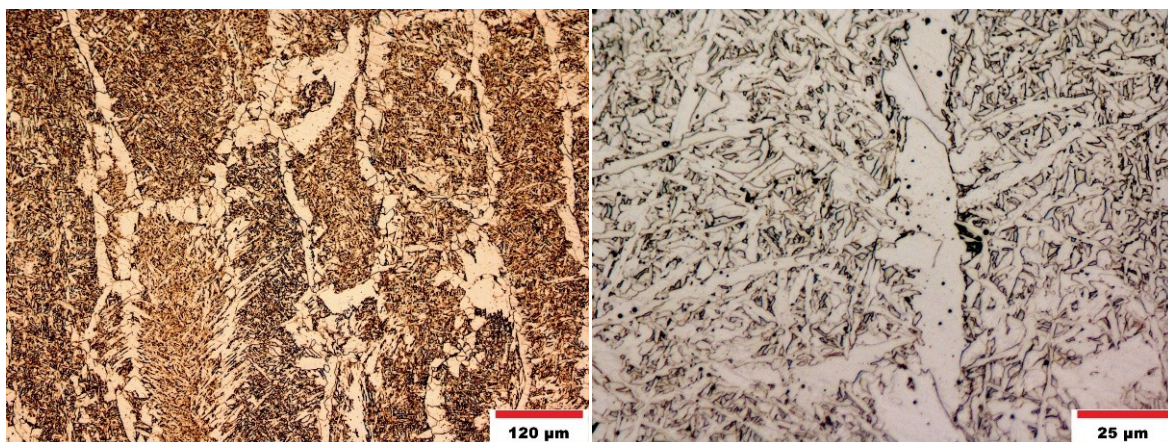
Tepelně ovlivněná zóna v oblasti 2 (obr. 38) vykazuje převážně jemnozrnnou feriticko-perlitickou strukturu, která vykazuje jak zřetelné zjemnění zrna v této oblasti, tak i místa s hrubší strukturou. Ve zjemněné oblasti lze pozorovat rovnoměrně rozložená zrna feritu a perlitu s náznakem částečného výskytu řádkovitosti. Perlit se utváří převážně na hranicích zrn úměrně obsahu uhlíku základního materiálu. Směrem k základnímu materiálu bude rozložení struktury méně rovnoměrné a začne se projevovat vliv původní řádkovité feriticko-perlitické struktury základního materiálu.





*Obr. 39: Oblast 3 – mikrostruktura TOZ u zkušebního vzorku „N“*

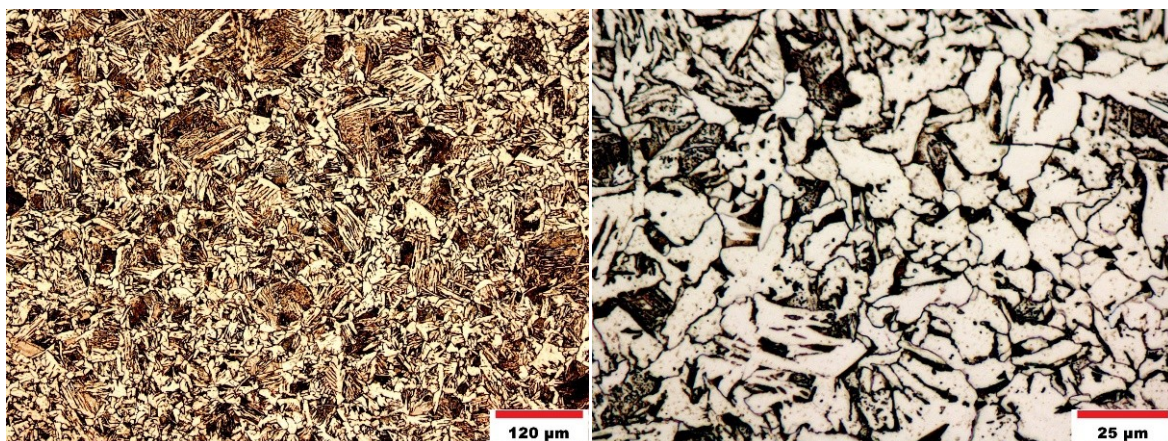
Tepelně ovlivněná zóna v oblasti 3 (obr. 39) vykazuje převážně hrubozrnnou feriticko-perlitickou strukturu. V oblasti 3 jsou patrné převážně zrna feritu s pilovitými výběžky s výskytem Widmannstättenových jehlic, místy se pravděpodobně vyskytuje i bainit. Widmannstättenova struktura není žádoucí, jelikož většinou dochází ke zkřehnutí oceli, respektive poklesu vrubové houževnatosti. Perlit se vyskytuje převážně ve formě globulární. V této oblasti došlo k výraznému promísení svarového kovu a základního materiálu.



*Obr. 40: Oblast 4 – mikrostruktura SK u zkušebního vzorku „N“*

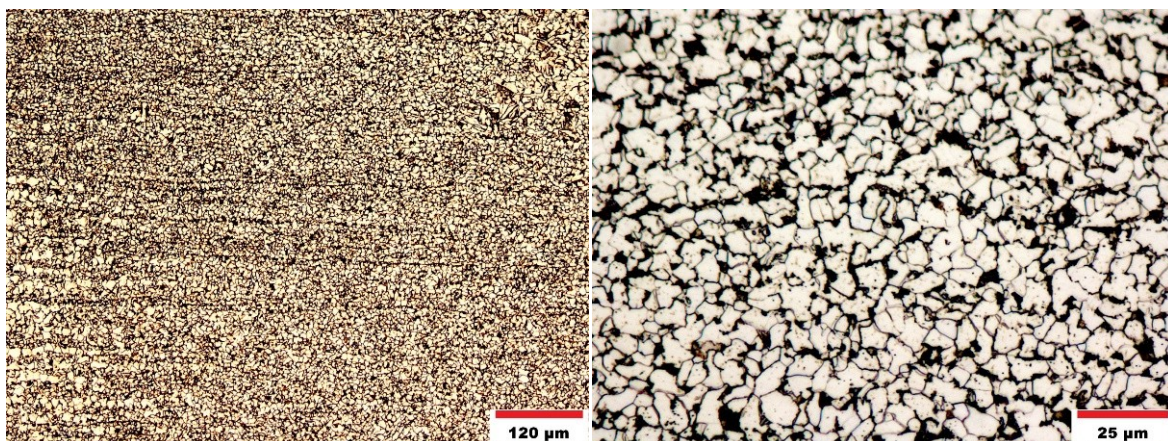
Struktura svarového kovu je feriticko-perlitická, vykazující menší podíl perlitu. V oblasti 4 (obr. 40) lze pozorovat Widmannstättenovy jehlice a desky (WF) ve více směrech, na hranicích zrn feritické síťoví. Jsou patrné jak jednoduché případy desek (latěk) Acikulárního feritu (AF), tak současně i vznik Acikulárního feritu hvězdčovitého uspořádání s místy jejich vzájemné kombinace. Mikrostruktura AF přispívá ke zvýšení pevnosti i houževnatosti svarového kovu. Místa s hrubší strukturou se vyskytují pravděpodobně v oblasti překryvu jednotlivých housenek a představují místa vyššího přehřátí materiálu.





*Obr. 41: Oblast 5 – mikrostruktura TOZ u zkušebního vzorku „N“*

Tepelně ovlivněná zóna v oblasti 5 (obr. 41) je podobná oblasti 3 a vykazuje převážně hrubozrnnou feriticko-perlitickou strukturu. V této oblasti došlo k výraznému promísení svarového kovu a základního materiálu, jsou patrné převážně zrna feritu s pilovitými výběžky a místa s výskytem Widmannstättenových jehlic, pravděpodobně částečně i bainit. Widmannstättenova struktura není žádoucí, jelikož většinou dochází ke zkřehnutí oceli, respektive poklesu vrubové houževnatosti. Perlit se vyskytuje převážně ve formě globulární.

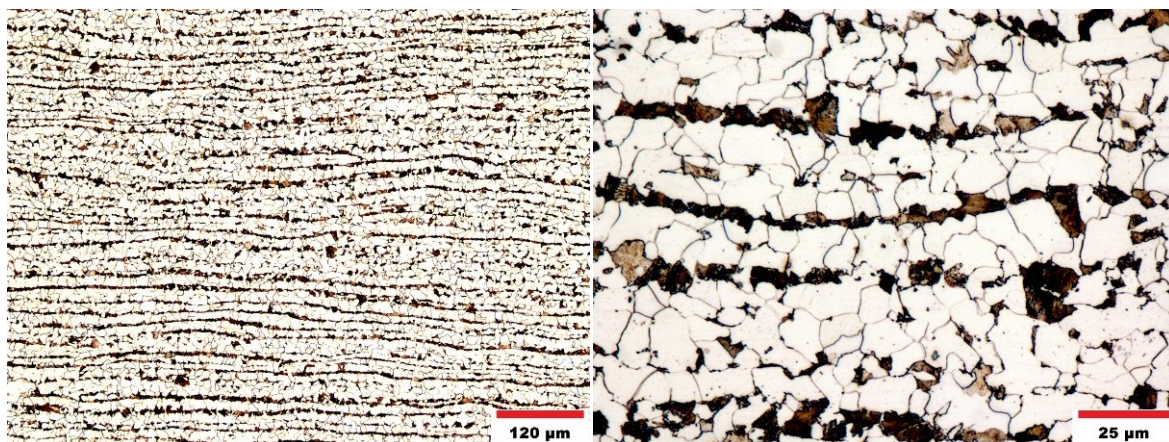


*Obr. 42: Oblast 6 – mikrostruktura TOZ u zkušebního vzorku „N“*

Tepelně ovlivněná zóna v oblasti 6 (obr. 42) podobně jako v oblasti 2 vykazuje převážně jemnozrnnou feriticko-perlitickou strukturu v jemnější formě než základní materiál. Lze pozorovat rovnoměrně rozložená zrna feritu a perlitu, který se utváří převážně na hranicích zrn úměrně obsahu uhlíku základního materiálu. Směrem k základnímu materiálu



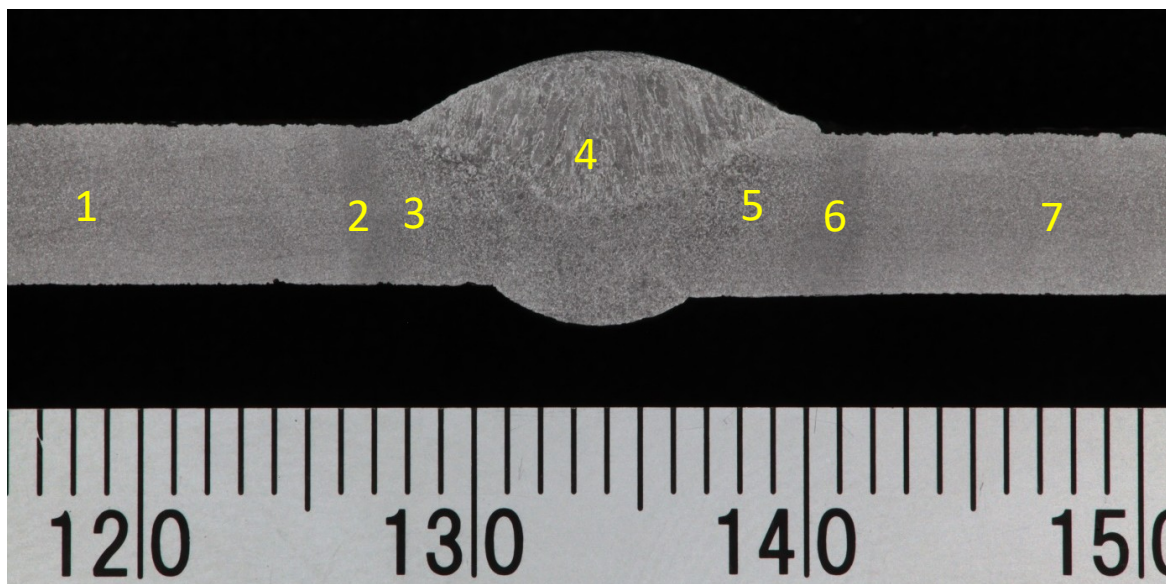
bude rozložení struktury méně rovnoměrné a začne se projevovat vliv původní řádkovité feriticko-perlitické struktury základního materiálu.



*Obr. 43: Oblast 7 – mikrostruktura ZM u zkušebního vzorku „N“*

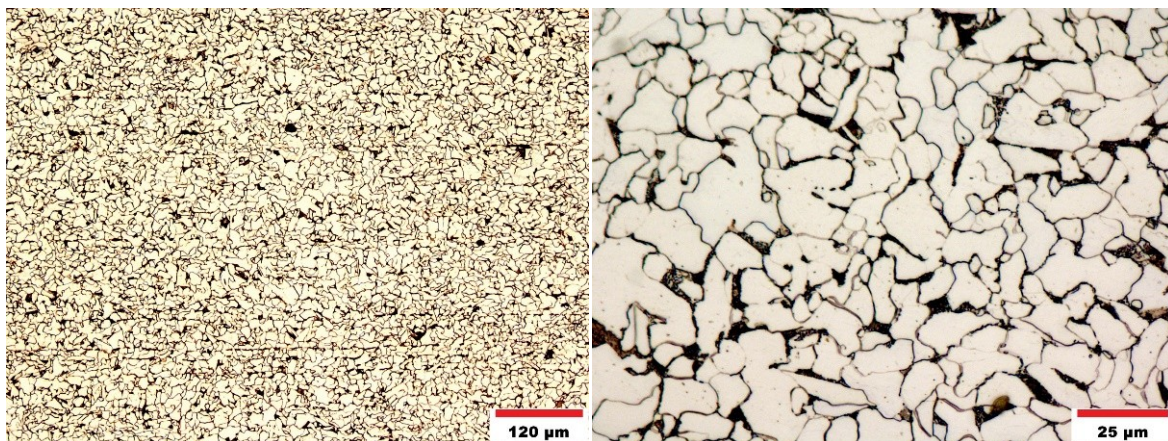
V oblasti 7 (obr. 43) stejně jako v oblasti 1 základního materiálu je opět zřetelná feriticko – perlitická struktura nízkouhlíkových ocelí s typickou řádkovitou texturou, která je projevem válcování ve směru tváření [44, 45].

#### *Mikrostrukturní rozbor zkušebního vzorku „M“*



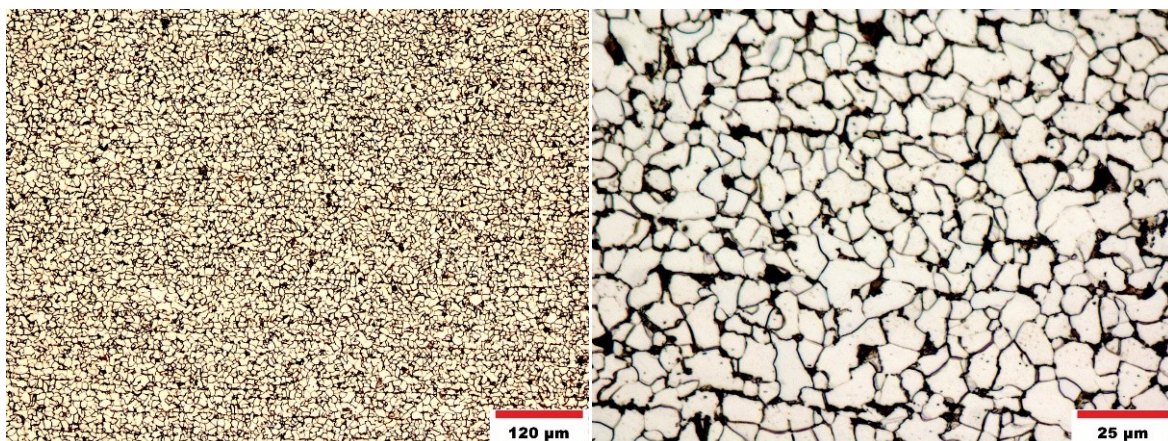
*Obr. 44: Rozložení zkoumaných oblastí mikrostruktury u zkušebního vzorku „M“*





*Obr. 45: Oblast 1 – mikrostruktura ZM u zkušebního vzorku „M“*

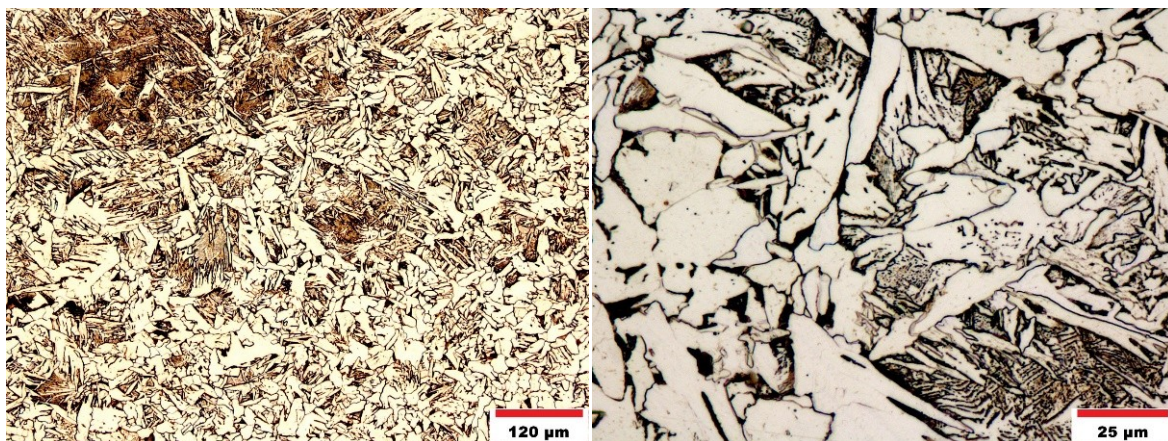
V oblasti 1 základního materiálu (obr. 45) je zřetelná feriticko – perlitická struktura s jemným náznakem řádkování, které je projevem termomechanického válcování ve směru tváření. Patrná jemnozrnná struktura s vyšším podílem feritu a nižším podílem perlitu, který se utváří převážně na hranicích zrn úměrně mírně nižšímu obsahu uhlíku základního termomechanicky zpracovaného materiálu oproti normalizačně žíhanému materiálu.



*Obr. 46: Oblast 2 – mikrostruktura TOZ u zkušebního vzorku „M“*

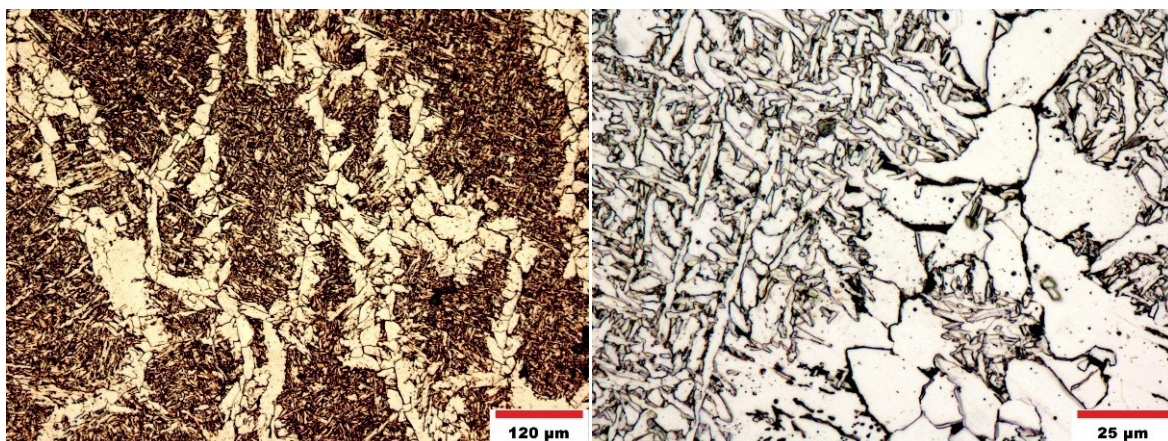
Tepelně ovlivněná zóna v oblasti 2 (obr. 46) vykazuje jemnozrnnou strukturu s jemnějšími zrny než jaké vykazuje základní materiál. Lze pozorovat feriticko-perlitickou strukturu s převážně rovnoměrně rozloženými zrny feritu a perlitu s jemným náznakem řádkování. Perlit se utváří převážně na hranicích zrn úměrně mírně nižšímu obsahu uhlíku základního termomechanicky zpracovaného materiálu.





*Obr. 47: Oblast 3 – mikrostruktura TOZ u zkušební vzorku „M“*

Tepelně ovlivněná zóna v oblasti 3 (obr. 47) vykazuje převážně hrubozrnnou feriticko-perlitickou strukturu. V oblasti 3 jsou patrné jak zrna feritu polyedrického a protáhlého tvaru, místy s pilovitými výběžky, tak i místa s výskytem Widmannstätténových jehlic. Widmannstätténova struktura není žádoucí, jelikož většinou dochází ke zkřehnutí oceli, respektive poklesu vrubové houževnatosti. Perlit je utvořen jak ve formě lamelární, tak i globulární.



*Obr. 48: Oblast 4 – mikrostruktura SK u zkušební vzorku „M“*

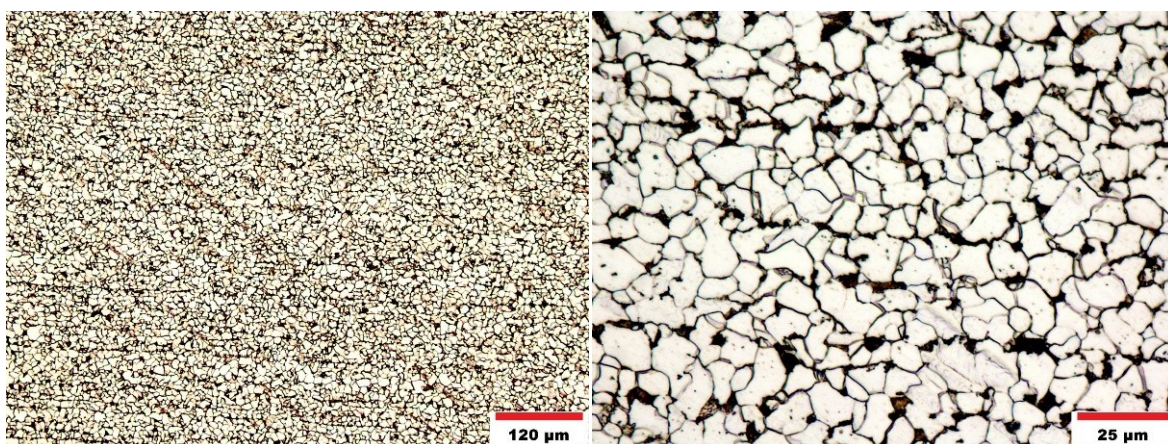
Struktura svarového kovu je feriticko-perlitická s menším podílem perlitu, v oblasti 4 (obr. 48) obsahuje pravděpodobně polygonální ferit v hrubém acikulárním feritu. Acikulární ferit (AF) je tvořen deskami (laťkami), mikrostruktura AF přispívá ke zvýšení pevnosti i houževnatosti svarového kovu. Místa s hrubší strukturou se vyskytují pravděpodobně v oblasti překryvu jednotlivých housenek a představují místa vyššího přehřátí materiálu.





*Obr. 49: Oblast 5 – mikrostruktura TOZ u zkušebního vzorku „M“*

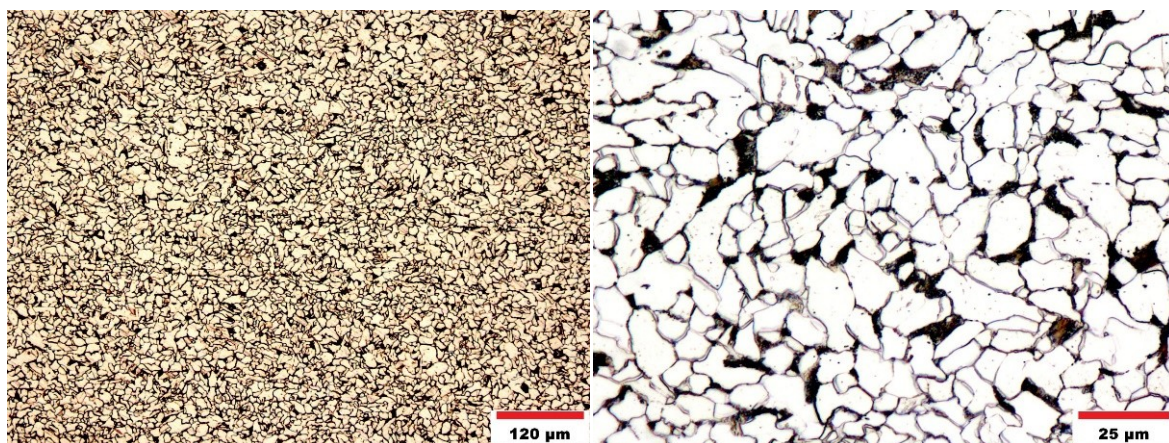
Tepelně ovlivněná zóna v oblasti 5 (obr. 49), tak jako v oblasti 3 vykazuje převážně hrubozrnnou feriticko-perlitickou strukturu. V oblasti 5 jsou patrné jak zrna feritu polyedrického a protáhlého tvaru, místy s pilovitými výběžky, tak i místa s výskytem Widmannstättenových jehlic. Widmannstättenova struktura není žádoucí, jelikož většinou dochází ke zkřehnutí oceli, respektive poklesu vrubové houževnatosti. Perlit je utvořen převážně ve formě globulární.



*Obr. 50: Oblast 6 – mikrostruktura TOZ u zkušebního vzorku „M“*

Tepelně ovlivněná zóna v oblasti 6 (obr. 50) obdobně jako v oblasti 2 vykazuje jemnozrnnou strukturu, která je jemnější než v základním materiálu. Lze pozorovat feriticko-perlitickou strukturu s převážně rovnoměrně rozloženými zrny feritu a perlitu s jemným náznakem řádkování. Perlit se utváří převážně na hranicích zrn úměrně mírně nižšímu obsahu uhlíku u základního termomechanicky zpracovaného materiálu.





Obr. 51: Oblast 7 – mikrostruktura ZM u zkušební vzorku „M“

V oblasti 7 základního materiálu (obr. 51) je opět zřetelná feriticko-perlitická struktura s jemným náznakem řádkování, vykazuje jemnozrnnou strukturu s vyšším podílem feritu, perlit se utváří převážně na hranicích zrn úměrně mírně nižšímu obsahu uhlíku základního termomechanicky zpracovaného materiálu [44-47].

#### 4.6 Chemická analýza základních trubních materiálů

Chemická analýza základních materiálů byla provedena pomocí optické emisní spektrometrie (OES), využívající obloukové a jiskrové buzení na zkušebních vzorcích, které byly připraveny jako výřezky o rozměru 25 x 25 mm z jednotlivých zkušebních trubních těles „N“ a „M“. Deklarované a zjištěné základní prvky jsou uvedeny v tabulce č.14 pro vzorek „N“ a v tabulce č. 15 pro vzorek „M“. Současně byly výpočtem (dle vzorce 1) ověřeny u obou vzorků jejich uhlíkové ekvivalenty.

Tabulka č. 14: Obsahy základních prvků oceli L245NE dle inspekčního certifikátu 3.1

L245NE	Obsahy prvků [%]						
Číslo tavby: 95797K	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni
	0,16	1,08	0,248	0,012	0,007	0,08	0,04
	Cr	Al	N	Mo	V	Ti	Nb
	0,06	0,030	0,003	0,006	0,001	0,003	<0,001
Ce	0,37						

Tabulka č. 15: Obsahy základních prvků oceli L245NE dle chemické analýzy

L245NE	Obsahy prvků [%]						
Vzorek N	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni
	0,155	1,05	0,255	0,017	0,012	0,076	0,041
	Cr	Al	N	Mo	V	Ti	Nb
	0,055	0,031	--	0,0071	0,0019	0,0017	<0,0040
Ce	0,35						

Tabulka č. 16: Obsahy základních prvků oceli L245MB dle inspekčního certifikátu 3.1

L245MB	Obsahy prvků [%]						
Číslo tavby: 01 896644	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni
	0,119	0,53	0,19	0,011	0,003	0,019	0,020
	Cr	Al	N	Mo	V	Ti	Nb
	0,031	0,030	0,003	0,005	0,002	0,005	<0,001
Ce	0,218						

Tabulka č. 17: Obsahy základních prvků oceli L245MB dle chemické analýzy

L245MB	Obsahy prvků [%]						
Vzorek M	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni
	0,143	0,5	0,195	0,017	0,0081	0,019	0,032
	Cr	Al	N	Mo	V	Ti	Nb
	0,037	0,031	--	0,003	0,0024	0,0053	<0,004
Ce	0,238						

Chemická analýza trubních základních materiálů byla provedena na zařízení SpectroMaxx na katedře Neželezných kovů, rafinace a recyklace (637), VŠB-TU Ostrava.

Porovnáním chemického složení, zjištěného na základě chemických rozborů jednotlivých základních materiálů s jejich atestovanými hodnotami dle příslušných materiálových listů (inspekčních certifikátů 3.1 dle ČSN EN 10204) vyplývá, že chemické složení vzorků „N“ a „M“ se významně shoduje s hodnotami, deklarovanými výrobcem v dodaných materiálových listech. Ověřené uhlíkové ekvivalenty vykazují shodné odchylky od deklarovaných hodnot výrobcem, kdy hodnota pro vzorek „N“ činí  $Ce = 0,35$  a pro vzorek „M“ činí  $Ce = 0,238$  a jsou v obou případech vyhovující. Chemickým rozbořem bylo prokázáno, že se v obou případech jedná o předmětnou ocel L245NE a L245MB, které jsou určeny pro rozvody topných plynů.

## 5 Vyhodnocení výsledků a závěr

Z provedených nedestruktivních zkoušek svarových spojů (VT, PT, RT) u zkušebních trubních kusů obou materiálů a to normalizačně žíhaného a termomechanicky zpracovaného nevyplývají žádné zásadní rozdíly. Výsledek kapilární zkoušky a zkoušky prozářením u obou materiálů byl hodnocen jako vyhovující, opačně vizuální kontrola svarů u zkušebních kusů obou materiálů byla hodnocena celkově jako nevyhovující. Vizuální kontrolou svarů bylo zjištěno, že svarové spoje u zkušebních kusů obou materiálů celkově sice nevyhověly požadovanému stupni jakosti „B“, případně „C“ dle ČSN EN ISO 5817 a ČSN EN 12732 pro vysokotlaké plynovody, které odpovídají kategorii jakosti plynovodů „D“ dle ČSN EN 12732, ale veškeré následně provedené destruktivní mechanické a metalografické zkoušky byly

hodnoceny jako vyhovující. To vede k závěru, že nevyhovující vady u vizuální kontroly s povahou méně závažných vad jako nadměrné převýšení tupého svaru, strmý přechod svaru, lineární přesazení, nadměrné převýšení kořene, nedokonalá kresba povrchu svaru nejsou rozhodující pro staticky namáhanou trubní konstrukci, pokud současně zkouška kapilární a především prozářením je vyhovující. Je potřeba ale podotknout, že i tyto méně závažné nevyhovující vady vyhověly stupni jakosti „D“ dle ČSN EN ISO 5817, to znamená, že dle normy ČSN EN 12732 jsou svarové spoje vyhovující pro nízkotlaké a středotlaké plynovody, což odpovídá kategorii jakosti plynovodů „B“ dle ČSN EN 12732. Lze tedy uvažovat závěr, že vizuální kontrola svarů je dle současných zavedených kritérií nastavena relativně přísně, protože i méně závažné vady vizuálně hodnocené ve stupni „D“ by nebyly důvodem případného snížení provozní životnosti plynovodů, které jsou provozovány jako staticky namáhané konstrukce za předpokladu, že zkouška prozářením příslušných svarů je vyhovující pro stupeň kvality plynovodů „D“ dle ČSN EN 12732, kde je přípustnost jednotlivých vnitřních vad svarových spojů požadována ve stupni „B“ nebo „C“ v souladu s normou ČSN EN 12732 a ČSN EN ISO 5817. Zkouška kapilární nebo magnetická prášková se na trase u svarových spojů běžně neprovádí, u VTL plynovodů je požadována dle ČSN EN 12732 jen u garančních svarů, které nebyly podrobeny tlakové zkoušce jako např. u propojovacích svarových spojů, tudíž zásadní pro bezpečný provoz plynovodů je při jeho výstavbě zkouška vizuální a zkouška prozářením nebo ultrazvukem.

Z provedených destruktivních mechanických a metalografických zkoušek u zkušebních vzorků, odebraných z trubních kusů obou materiálů, vyplývají určité rozdíly. Svarové spoje obou materiálů na základě realizovaných mechanických zkoušek nevykazují žádné nevyhovující mechanické vlastnosti, ale u svarového spoje termomechanicky zpracovaného materiálu lze předpokládat určitý pokles mechanických vlastností v TOZ svaru. Ze zkoušky tvrdosti je zřejmé, že normalizačně žíhaný materiál vykazuje příznivější průběh tvrdosti a s tím související pevnostní vlastnosti v TOZ svaru, kdy hodnota tvrdosti neklesá pod úroveň základního materiálu. Opačně u termomechanicky zpracovaného materiálu byl v TOZ svaru zjištěn za stejných podmínek svařování mírný pokles tvrdosti pod úroveň tvrdosti základního materiálu, signalizující i určitý pokles pevnostních vlastností. Nicméně k porušení při tahové zkoušce u zkušebních tyčí z termomechanicky zpracovaného materiálu došlo na hranici TOZ nebo v její těsné blízkosti ve vyžíhané oblasti zahřáté pod teplotou  $A_{c1}$ , kde již došlo k lokálnímu vystavení teplotám nad limitní teplotu 580°C, kdy již dochází k vyrušení příznivého účinku termomechanického zpracování. U normalizačně žíhaného materiálu došlo k porušení ve zřetelně větší vzdálenosti od TOZ v neovlivněném základním

materiálu, což vypovídá o rozdílném vlivu metalurgického procesu svařování na jednotlivé materiály. Přesto tahová zkouška, respektive hodnota meze pevnosti vyhověla i u termomechanicky zpracovaného materiálu a to dokonce pro vyšší hodnotu z příslušné tavby dle materiálového listu, z čehož vyplývá, že pokud je vhodně limitován tepelný příkon při svařování, je pokles pevnostních vlastností přijatelný nebo i žádný.

Kontrolou mikrostruktury bylo ověřeno, že ve svarových spojích došlo vlivem metalurgického procesu při svařování k mikrostrukturálním změnám v TOZ svarů obou materiálů, kde k nejméně příznivé změně mikrostruktury došlo u obou materiálů v oblasti přehřátí nad teplotou  $A_{c3}$ , která vykazuje převážně hrubozrnnou feriticko-perlitickou strukturu s místy výskytu Widmannstättenových jehlic. Tuto nežádoucí strukturu u normalizačně žíhaného materiálu by bylo možné eliminovat opět provedením normalizačního žíhání. Přesto související pokles plastických vlastností byl přijatelný, jelikož zkouška lámavosti u svarových spojů obou materiálů je vyhovující a prokázala dostatečnou deformační schopnost tupých svarových spojů. Mikrostruktura svarového kovu je zcela odlišná od tepelně ovlivněné zóny a vzhledem k nižšímu obsahu uhlíku vykazuje menší podíl perlitu. U normalizačně žíhaného materiálu obsahuje Widmannstättenovy jehlice a desky (WF) ve více směrech, na hranicích zrn feritické síťoví. U termomechanicky zpracovaného materiálu obsahuje pravděpodobně polygonální ferit v hrubém acikulárním feritu.

Chemickou analýzou obou základních materiálů, provedenou pomocí optické emisní spektrometrie, bylo porovnáním s jejich atestovanými hodnotami dle příslušných materiálových listů (inspekčních certifikátů 3.1 dle ČSN EN 10204) ověřeno, že se v obou případech jedná o předmětnou ocel L245NE a L245MB, které jsou určeny pro rozvody topných plynů. Současně byly výpočtem ověřeny u obou vzorků i jejich uhlíkové ekvivalenty s vyhovujícími výsledky.

Na základě získaných výsledků realizovaných zkoušek lze konstatovat, že oba materiály při dodržení podmínek a parametrů svařování jsou rovnocenné a z hlediska metalurgické, konstrukční a technologické svařitelnosti nevykazují žádné zásadní rozdíly. Nicméně vzhledem k vyšší náchylnosti na dodržení svařovacích parametrů u termomechanicky zpracovaného materiálu, respektive množství vneseného tepla do svaru, se jeví jako příznivější při výstavbě plynovodů i s ohledem na riziko chování na staveništích při dělení materiálu použitím normalizačně žíhaného materiálu. Při dělení materiálu u termomechanicky zpracovaného materiálu se nesmí použít technologie dělení, u které by mohlo dojít k tepelnému ovlivnění materiálu nad limitní teplotu  $580^{\circ}\text{C}$ , kdy již dochází k nevratné degradaci materiálu.



Ačkoliv termomechanicky zpracovaný materiál je moderní a perspektivní metoda zpracování ocelových materiálů a je v předpisovém rámci pro přepravu topných plynů v plynárenství považován za rovnocenný materiál k materiálu normalizačně žíhanému, na základě výsledků provedených zkoušek vzhledem k použité metodě tavného svařování (obloukové svařování ručně obalenou elektrodou) i s ohledem na vyšší pořizovací náklady trubních ocelí z termomechanicky zpracovaných materiálů, se jeví celkově příznivější a lze doporučit použití potrubní oceli z normalizačně žíhaného materiálu, zejména u ocelí, kde je projektově dostačující mez kluzu do výše 360 MPa, což pokrývá podskupinu VTL plynovodů B1 s provozním tlakem do 40 bar (4,0 MPa).

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] **Jančar, Dalibor.** Plynárenství. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2013.
- [2] TPG 702 04. *Plynovody a přípojky z oceli s nejvyšším provozním tlakem do 100 bar včetně.* Praha : Český plynárenský svaz, 2013. ISBN 978-80-7328-284-4.
- [3] **Gajdoš, Ľubomír a kolektiv.** *Bezpečnost a integrita vysokotlakých plynovodů.* Praha : Český plynárenský svaz, 2011. ISBN 978-80-904619-2-5.
- [4] **Gajdoš, Ľubomír a kolektiv.** *Spolehlivost plynovodních potrubí.* Praha : Vydavatelství ČVUT, Praha, 2000. ISBN 80-01-02143-2.
- [5] ČSN EN ISO 3183. *Naftový a plynárenský průmysl - Ocelové trubky pro porubní přepravní systémy.* Praha : ÚNMZ, 2014.
- [6] **Kolektiv autorů.** *Materiály a jejich svařitelnost.* Ostrava : Česká svařečská společnost ANB, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
- [7] **Kolektiv autorů.** *Materiály a jejich svařitelnost.* Ostrava : Český svařečský ústav s.r.o., 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [8] **D. Belato Rosado, W. De Waele, D. Vanderschueren, S. Hertelé.** LATEST DEVELOPMENTS IN MECHANICAL PROPERTIES AND METALLURGICAL FEATURES OF HIGH STRENGTH LINE PIPE STEELS. [Online] 2013. [Citace: 26. únor 2019.] <https://core.ac.uk/download/pdf/55732698.pdf>.
- [9] Thermomechanical Controlled Processing (TMCP) Optimizing the Roles of Niobium and Finishing Temperature. [Online] 2018. [Citace: 2. březen 2019.] <https://www.cbmm.com/-/media/CBMM/Resource-Center/PDFs/Processes---Processos/Thermomechanical-Controlled-Processing-TMCP-Optimizing-the-Roles-of-Niobium-and-Finishing-Temperatur.ashx>.
- [10] **Kocich, Radim.** Termomechanické procesy tváření. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3586-0.
- [11] *Stresstesty u potrubních těles z ocelí s vyššími pevnostními vlastnostmi.* **Linhart, Václav a Sigmundová, Jana.** Praha : SVÚM a.s., Podnikatelská 565, Praha 9–Běchovice, 2007.
- [12] **Lasek, Stanislav.** Lomová mechanika. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2013.
- [13] **Strnadel, Bohumír.** Nauka o materiálu II - Degradací procesy a design konstrukčních materiálů. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1842-9.
- [14] **Humhal, František.** Zásady pro projektování, výstavbu, rekonstrukce a opravy místních sítí. *Technický požadavek GRID\_TX\_G08\_04\_04.* Brno : RWE GasNet, 2014.
- [15] **Krásá, Tomáš.** Zásady pro projektování, výstavbu, opravy a rekonstrukce VTL plynovodů a přípojek do 40 bar. *Technický požadavek GRID\_TX\_08\_02\_04.* Brno : GasNet, 2017.
- [16] **Kuboň, Zdeněk.** Technologie spojování materiálů pro energetiku. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2018.

- [17] **Raza, Anis, Kashyap, Sudhir Kumar a Rakesh.** THE EFFECT OF WELDING ON MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF MATERIALS- A CRITICAL REVIEW. [Online] 2016. [Citace: 6. březen 2019.] <https://pdfs.semanticscholar.org/dcb1/c8444c477304e96399af52289ceface59e0a.pdf>. ISSN Online: 2394-0425.
- [18] **Douša, Michal.** Technologie I, část svařování. [Online] 2010. [Citace: 6. březen 2019.] <https://anzdoc.com/technologie-i-ast-svaovani-kontakt-kancela-budova-e-2-patro-.html>.
- [19] **Beneš, Libor.** Svařování. [Online] [Citace: 6. březen 2019.] [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf).
- [20] **Kopřiva.** Ruční obloukové svařování. [Online] [Citace: 6. březen 2019.] <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=33447&instance=2>.
- [21] **CARY, Howard B a Scott C, HELZER.** *Modern Welding Technology*. New Jersey : 6th ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005. ISBN 0-13-113029-3.
- [22] **JEFFUS, Larry F.** *Welding: Principles and Applications*. Boston : Eighth edition. Boston: Cengage Learning, 2016. ISBN 978-1-305-49469-5.
- [23] **Kolektiv autorů.** *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava : Česká svářečská společnost ANB, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
- [24] Přídavné materiály pro svařování potrubí. *ESAB VAMBERK, s.r.o.* [Online] [Citace: 8. březen 2019.] [http://products.esab.com/ESABImages/Pipeline\\_CZ.pdf](http://products.esab.com/ESABImages/Pipeline_CZ.pdf).
- [25] ČSN EN 12732. *Zásobování plynem-Svařované ocelové potrubí-Funkční požadavky*. Praha : ÚNMZ, 2014.
- [26] **WANG, Jian-Ming, a další.** Research on Welding Heat Affected Zone of Pipeline Steel in High Heat Input Welding. [Online] 2015. [Citace: 10. březen 2019.] <https://www.atlantispress.com/proceedings/icmsa-15/23189>. ISBN 978-94-62520-75-2.
- [27] **autorů, Kolektiv.** *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. Ostrava : Česká svářečská společnost ANB, 2017. ISBN 978-80-906720-0-0.
- [28] **Minařík, Václav.** *Obloukové svařování*. Praha : Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-28-9.
- [29] **Rytířová, Jana.** Svařovací materiály. [Online] 2016. [Citace: 11. březen 2019.] <https://docplayer.cz/24414451-Studijni-materialy-svarovaci-materialy.html>.
- [30] **Fejgl, František.** Svářečské práce na PZ a jejich kontrola. *Metodický pokyn GRID\_MP\_G09\_13\_03*. Brno : GasNet, 2014.
- [31] **autorů, Kolektiv.** *Svařování ocelového potrubí v plynárenství*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, Český svářečský ústav s.r.o., Severomoravská plynárenská, a.s., 2007. ISBN 978-80-248-1325-7.
- [32] Svařované ocelové plynovody. *Odborné plynárenské vzdělávání*. Brno : TDS Brno - SMS, s.r.o., 2009.

- [33] ČSN EN ISO 15614-1. *Kvalifikace a stanovení postupu svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování oceli a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha : ÚNMZ, 2018.
- [34] **Míšek, Bohumír**. Požadavky na kvalitu svarových spojů konstrukcí a kritéria hodnocení přípustnosti vad. [Online] 2008. [Citace: 14. březen 2019.] <https://www.ndt.net/article/defektoskopie2008/papers/159.pdf>.
- [35] **Peňáz, Pavel**. Předběžná specifikace postupu svařování (pWPS). Olomouc : Firemní svářečský dozor, 2018.
- [36] **Pejřimovský, Jiří**. Postup vizuální kontroly svarů ocelových potrubí PZ. *GRID\_MP\_G09\_13\_03*. Plzeň : GasNet, 2014.
- [37] ČSN EN ISO 6520-1. *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování*. Praha : ÚNMZ, 2008.
- [38] ČSN EN ISO 5817. *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů kvality*. Praha : ÚNMZ, 2014.
- [39] ČSN EN ISO 17637. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha : ÚNMZ, 2018.
- [40] ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem*. Praha : ÚNMZ, 2013.
- [41] ČSN EN ISO 5173. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky ohybem*. Praha : ÚNMZ, 2010.
- [42] ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Praha : ÚNMZ, 2011.
- [43] ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha : ÚNMZ, 2014.
- [44] ČSN 42 0469. *Metalografické hodnocení ocelových plechů a pásů*. Praha : ÚNMZ Praha, 1980.
- [45] **Mazancová, Eva**. Materiály pro náročné technické aplikace. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2013.
- [46] **Boumerzoug, Zakaria, Derfouf, Chemseddine a Baudin, Thierry**. Effect of Welding on Microstructure and Mechanical Properties of an Industrial Low Carbon Steel. [Online] 2010. [Citace: 2. duben 2019.] [https://www.researchgate.net/publication/245574430\\_Effect\\_of\\_Welding\\_on\\_Microstructure\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_an\\_Industrial\\_Low\\_Carbon\\_Steel](https://www.researchgate.net/publication/245574430_Effect_of_Welding_on_Microstructure_and_Mechanical_Properties_of_an_Industrial_Low_Carbon_Steel).
- [47] *Metallography and Microstructures*. USA : ASM Handbook, Volume 9, 2004. ISBN: 0-87170-706-3.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol/Zkratka	Jednotka	Název
$R_e$	[MPa]	Výrazná mez kluzu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu při 0,2 % plastické deformaci
$R_{t0,5}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu při 0,5 % celkové deformaci
$R_{fs}$	[MPa]	Mez „flow stress“
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
A	[%]	Tažnost
KCV	[J/cm <sup>2</sup> ]	Vrubová houževnatost
$K_c$	[MPa.m <sup>1/2</sup> ]	Lomová houževnatost
PN	[bar]	Nominální tlak (Pressure Nominal)
DN	[mm]	Nominální průměr (Diameter Nominal)
D	[mm]	Vnější průměr potrubí
t	[mm]	Jmenovitá tloušťka stěny potrubí
d	[mm]	Průměr jádra elektrody
HV10	[-]	Tvrdost podle Vickerse při zatížení 98 N
$Ce_{(IIW)}$	[-]	Uhlíkový ekvivalent dle IIW/IIS
IIW		Mezinárodní institut svařování (International Institute of Welding)
WPS		Specifikace postupu svařování (Welding Procedure Specification)
pWPS		Předběžná specifikace postupu svařování (Preliminary Welding Procedure Specification)
WPQR		Protokol o kvalifikaci postupu svařování (Welding Procedure Qualification Report)
EWT		Evropský svářečský technolog (European Welding Technologist)
PH		Svislý směr svařování zdola nahoru
ZM		Základní materiál
SK		Svarový kov
TOO(Z)		Tepelně ovlivněná oblast (zóna)
AF		Acikulární ferit

WF	Widmannstättenuv ferit
NDT	Nedestruktivní zkoušení (Non-Destructive Testing)
DWT	Rázová zkouška padajícím závažím (Drop Weight Test)
DWTT	Zkouška rázem v ohybu velkých těles skutečné tloušťky (Drop Weight Tear Test)
TMP	Termomechanické zpracování (Thermomechanical Processing)
TMCP	Termomechanické řízené zpracování (Thermomechanical Controlled Processing)
VT	Vizuální kontrola (Visual Testing)
PT	Penetrační zkouška (Penetrant Testing)
MT	Magnetická zkouška (Magnetic Testing)
UT	Ultrazvuková zkouška (Ultrasonic Testing)
RT	Rentgenová zkouška (Radiographic Testing)